

Geofysiske metoder i forureningssager – TEM, GCM, ERT og seismik



Anders Vest Christiansen

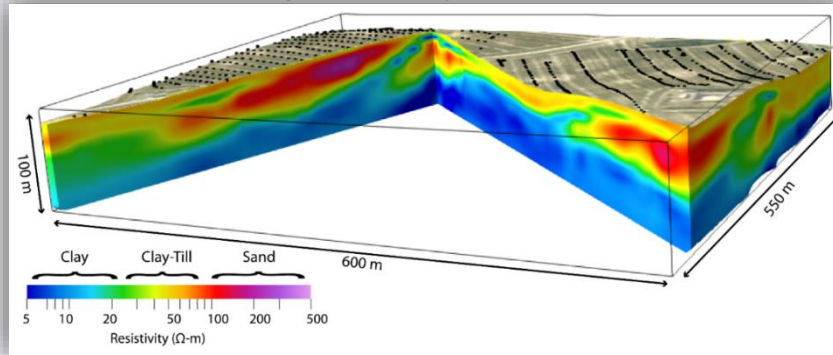
Hydrogeofysik-Gruppen, Geoscience, Aarhus Universitet

Kortlægning



Kortlægning

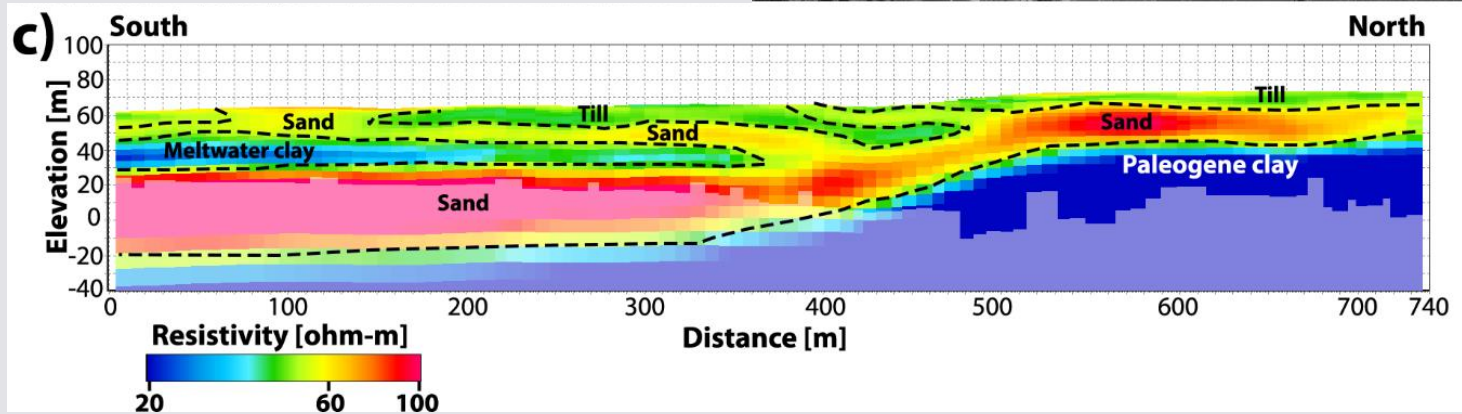
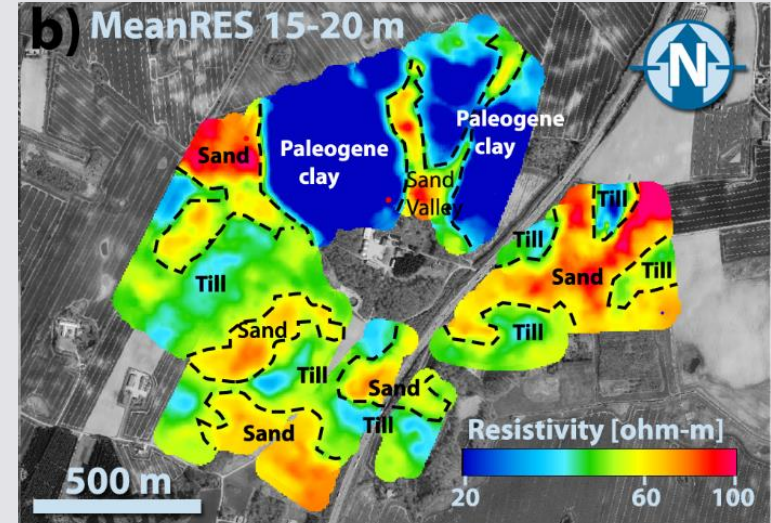
Geoph. image of the subsurface



Kortlægning

- **Geologi / Forurening**

- Direkte kortlægning, borer
- Indirekte kortlægning, (geo-)fysiske egenskaber:
 - Elektrisk ledningsevne
 - Seismisk hastighed
 - Densitet
 - Magnetisk susceptibilitet



The geophysical toolbox

Electrical – *contact*



Electromagnetic – *no contact*



Seismic – *contact*



Georadar !

The geophysical toolbox

Electrical – *contact*

- Resistivity
 - Lithology (clay or sand?)
 - Water quality (salinity)

Electromagnetic – *no contact*

- Resistivity
 - Lithology (clay or sand?)
 - Water quality (salinity)

Seismic – *contact*

- Seismic velocity and density
 - Structures (contrast)



The geophysical toolbox

Electrical – *contact*

- Resistivity
 - Lithology (clay or sand?)
 - Water quality (salinity)

Electromagnetic – *no contact*

- Resistivity
 - Lithology (clay or sand?)
 - Water quality (salinity)

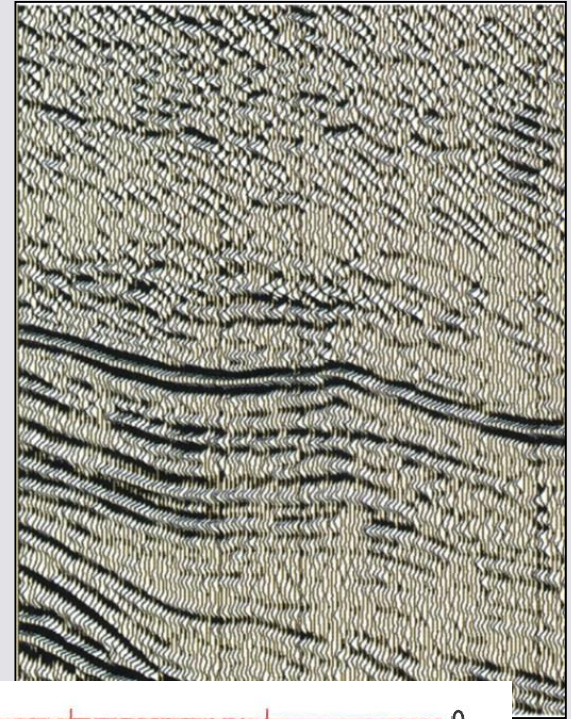
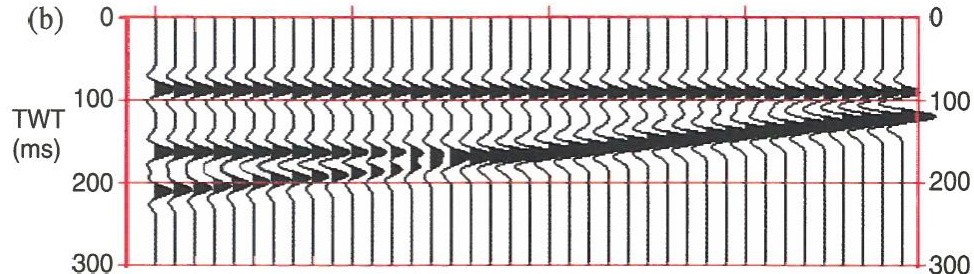
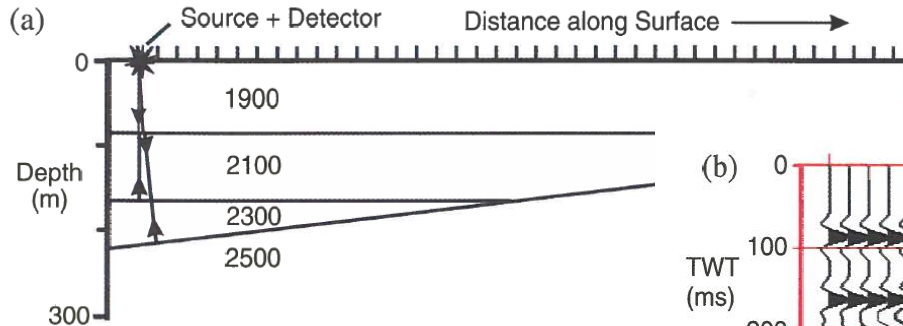
Seismic – contact

- Seismic velocity and density
- Structures (contrast)



Refleksions-seismik

- Trykbølger til gengivelse af strukturer
 - En trykbølge genereres
 - Bølgen bevæger sig igennem jordlagene
 - Bølgene reflekteres på grænseflader
 - Refleksionen optages (på jordoverfladen)
 - Refleksionsmønsteret danner "billeder" af undergrunden



Resolution of reflection seismic data

- Depending on the frequencies we can

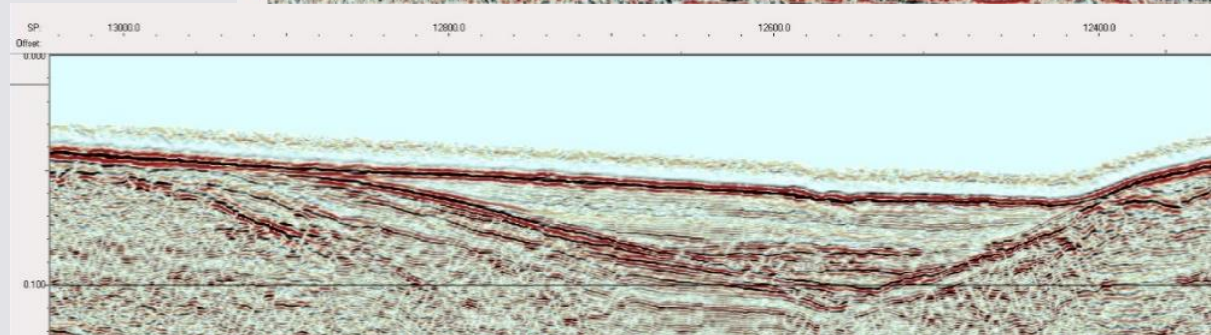
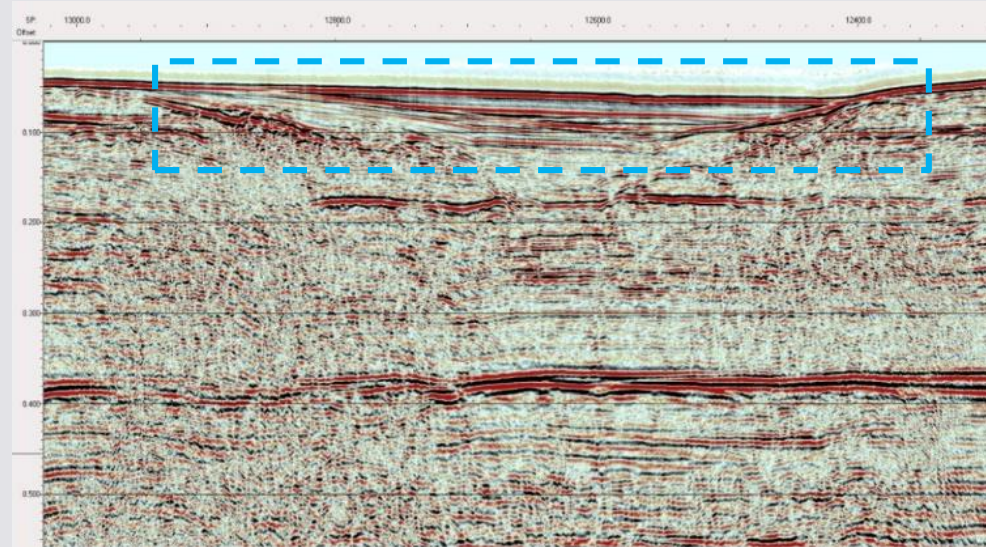
- See deep and less detailed
- See detailed and shallower

- Airgun

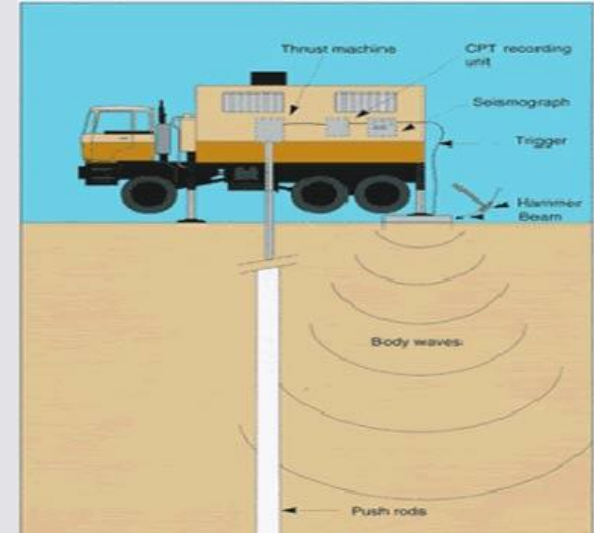
- Frequency ca. 20-100 Hz
- Penetration ca. 1-10 km
- Resolution ca. 10-20 m

- Sparker

- Frequency: 50-1000 Hz
- Penetration ca 100-200 m
- Resolution ca. 1-2 m



Vibro-seis



Land seismic acquisition

Pressure waves generated by vibrating the Earth
Sweep through a range of frequencies



The geophysical toolbox

Electrical – *contact*

- Resistivity
 - Lithology (clay or sand?)
 - Water quality (salinity)

Electromagnetic – *no contact*

- Resistivity
 - Lithology (clay or sand?)
 - Water quality (salinity)

Seismic – *contact*

- Seismic velocity and density
 - Structures (contrast)



The geophysical toolbox

Electromagnetic – *no contact*

- Resistivity
 - Lithology (clay or sand?)
 - Water quality (salinity)

Seismic – *contact*

- Seismic velocity
 - Structures (contrast)

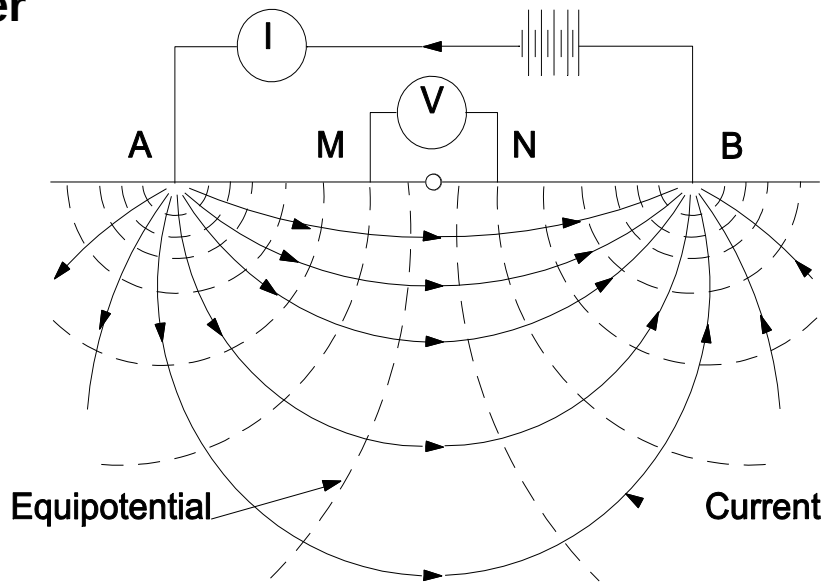
Electrical – *contact*

- Resistivity
 - Lithology (clay or sand?)
 - Water quality (salinity)



Værktøjskassen

1. Elektriske metoder



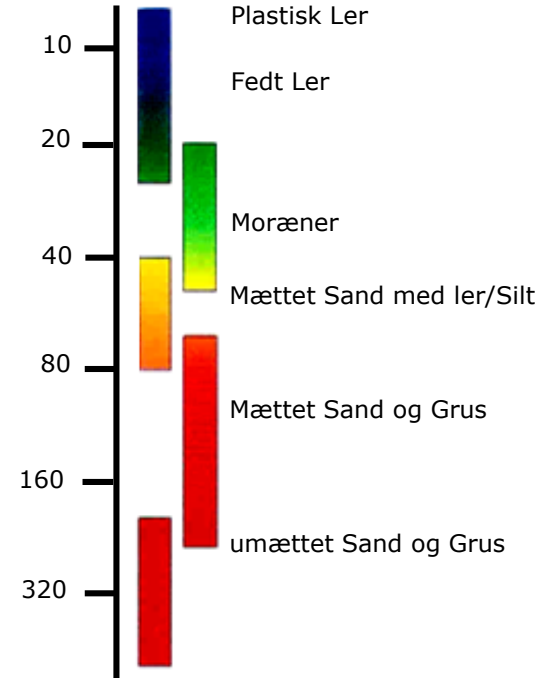
Hvad måler vi?

Resistiviteten afhænger af:

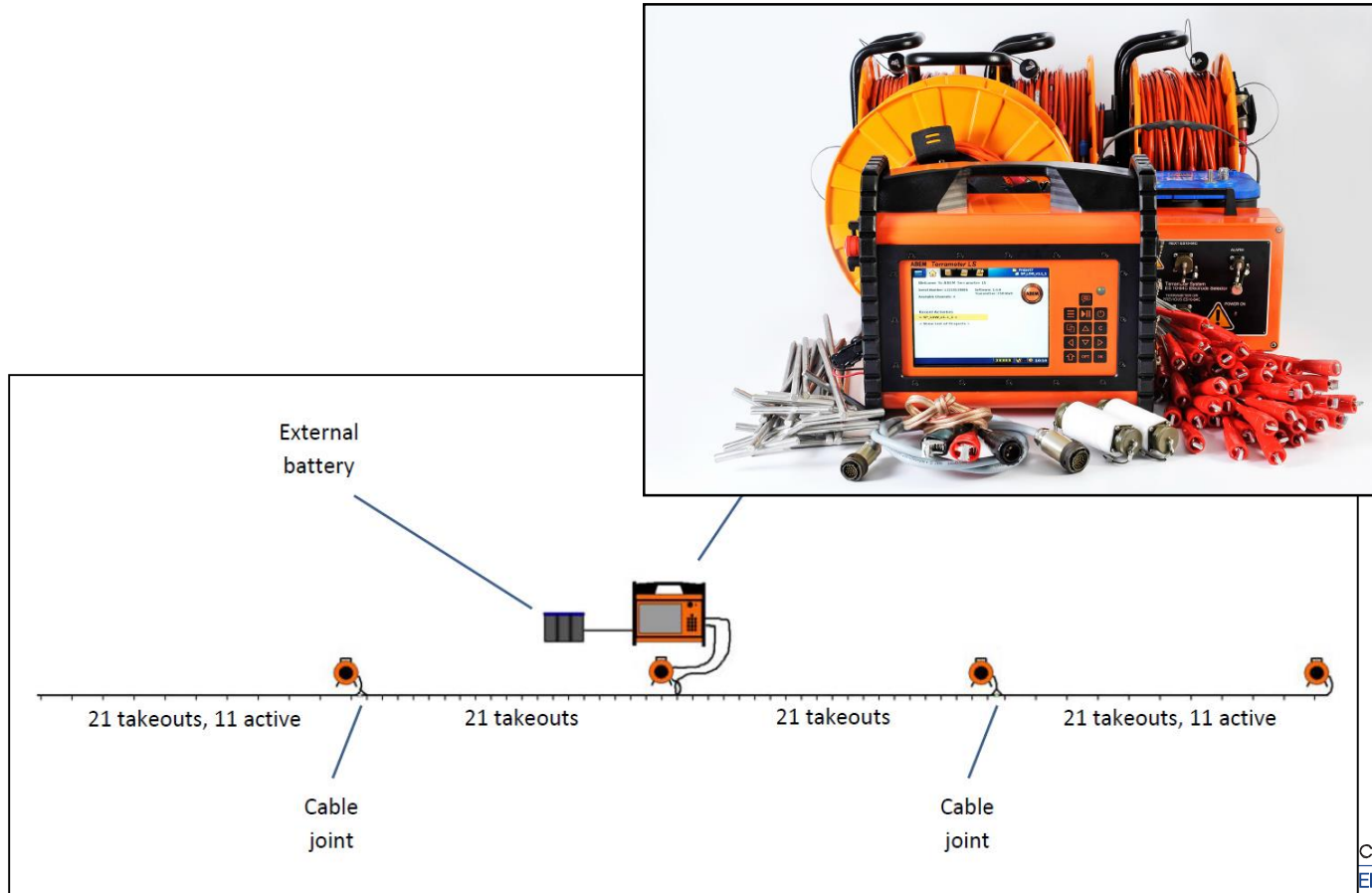
- Sediment type – sand eller
- Ion-indhold af porevæske
- Porøsitet



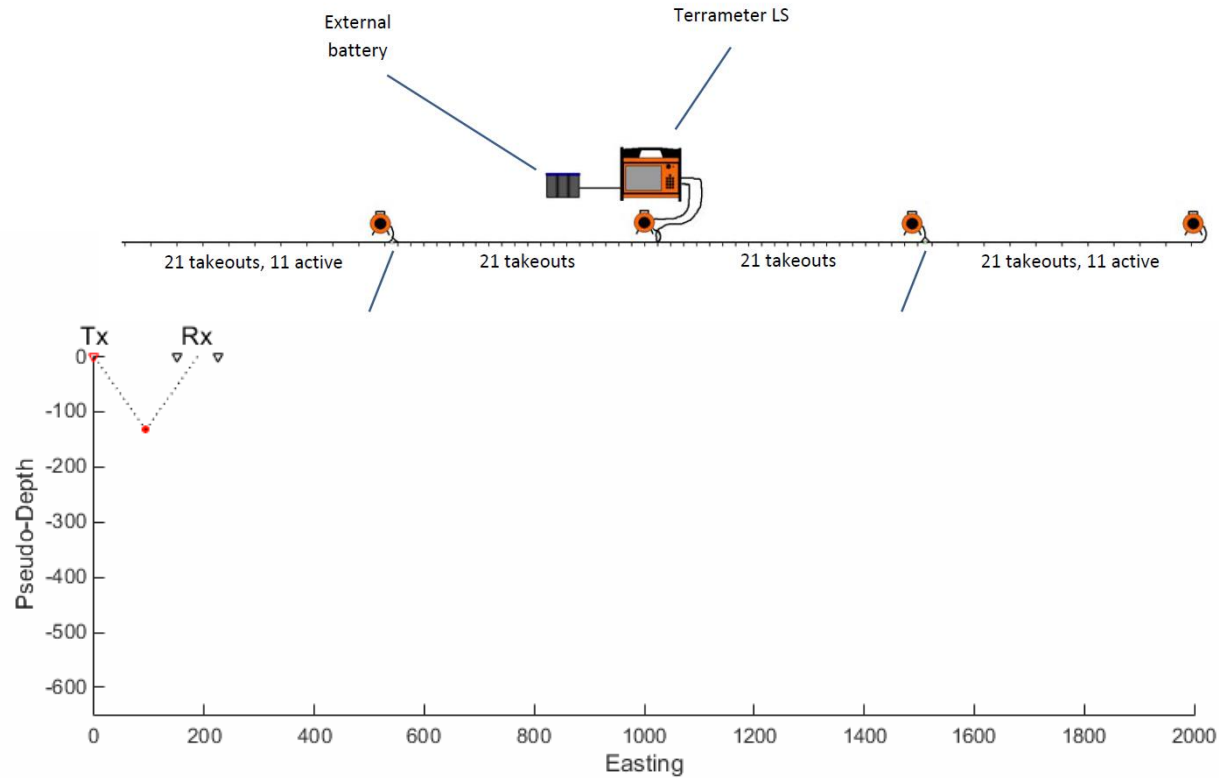
Resistiviteten af forskellige jordtyper



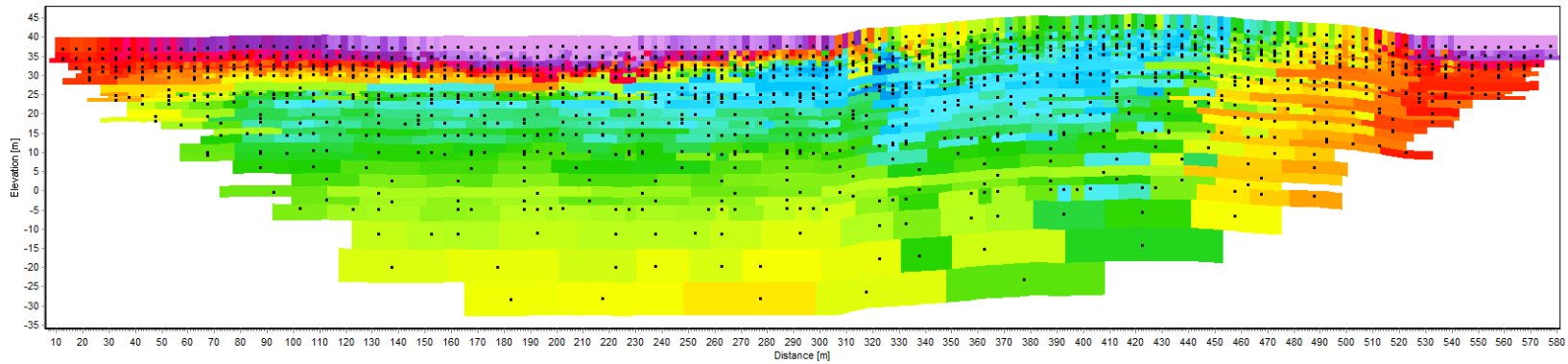
Multi-electrode profiling (CVES, MEP, ERT)



Målinger

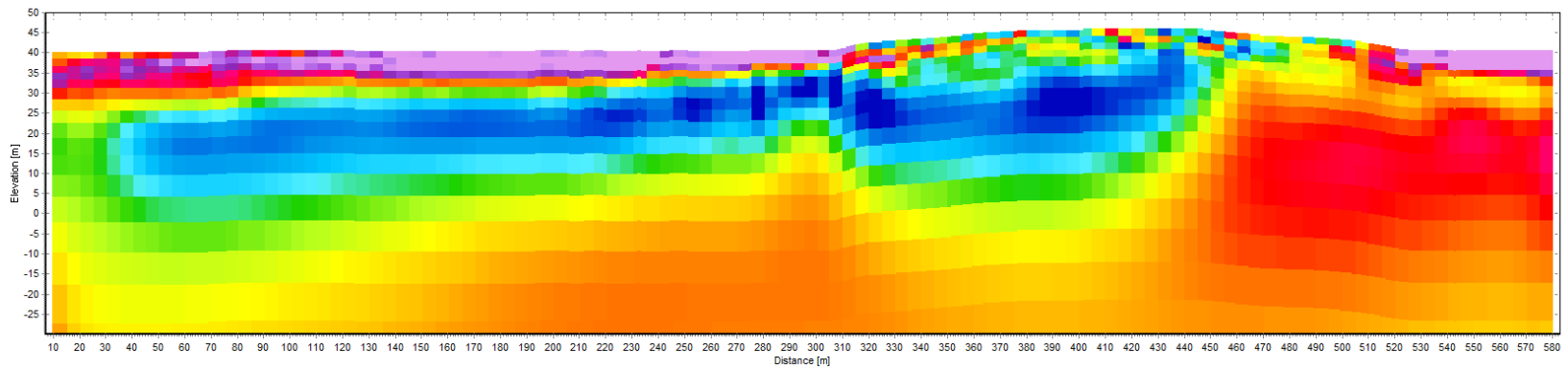


- DC Pseudo
- DC Forward
- DC Residual
- DC Model



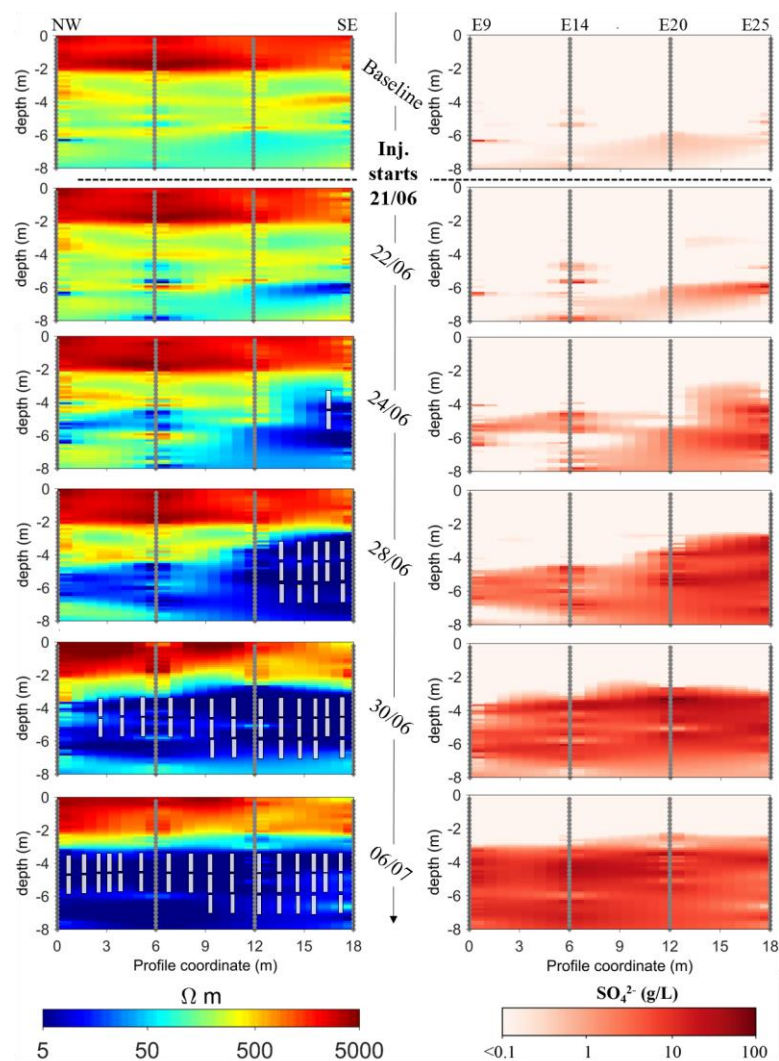
Display Settings...

- DC Pseudo
- DC Forward
- DC Residual
- DC Model



Display Settings...

Cross-borehole



The geophysical toolbox

Electrical – *contact*

- Resistivity
 - Lithology (clay or sand?)
 - Water quality (salinity)

Electromagnetic – *no contact*

- Resistivity
 - Lithology (clay or sand?)
 - Water quality (salinity)

Seismic – *contact*

- Seismic velocity
 - Structures (contrast)



The geophysical toolbox

Electrical – *contact*

- Resistivity
 - Lithology (clay or sand?)
 - Water quality (salinity)

Seismic – *contact*

- Seismic velocity
 - Structures (contrast)

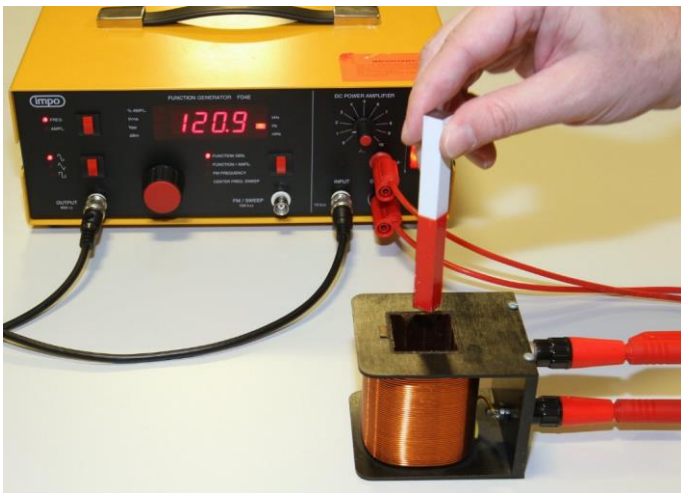
Electromagnetic – *no contact*

- Resistivity
 - Lithology (clay or sand?)
 - Water quality (salinity)



Værktøjskassen

2. Elektromagnetiske metoder



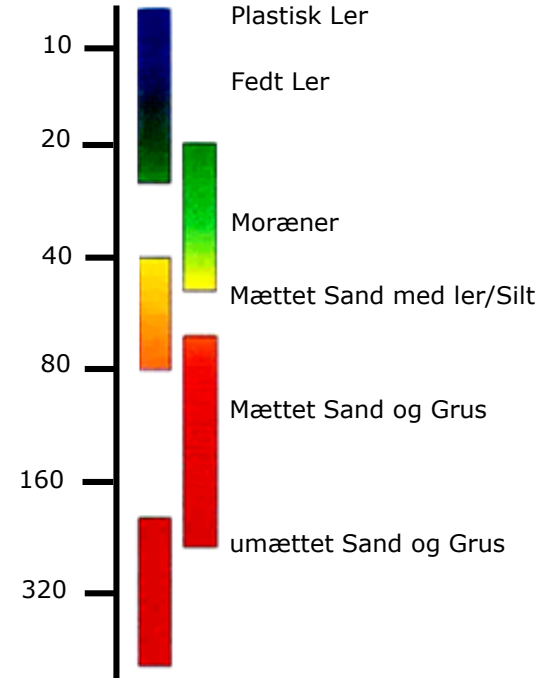
Hvad måler vi?

Resistiviteten afhænger af:

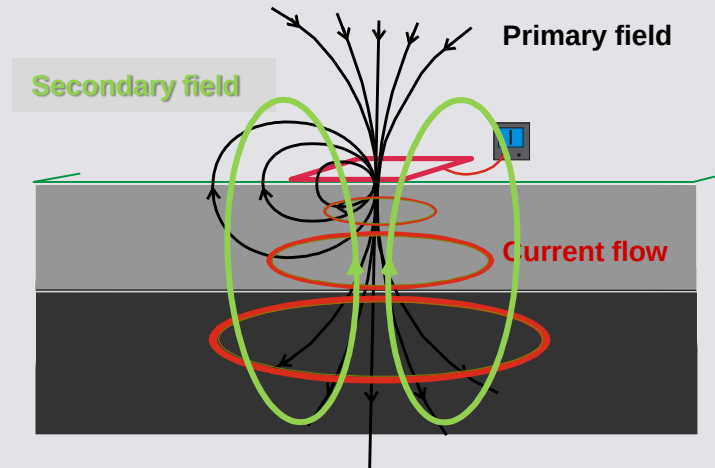
- Sediment type – sand eller
- Ion-indhold af porevæske
- Porøsitet



Resistiviteten af forskellige jordtyper

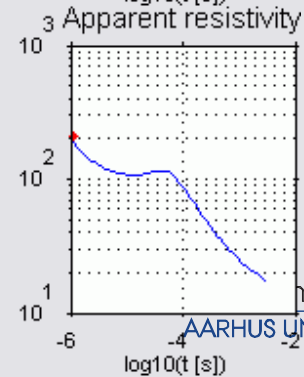
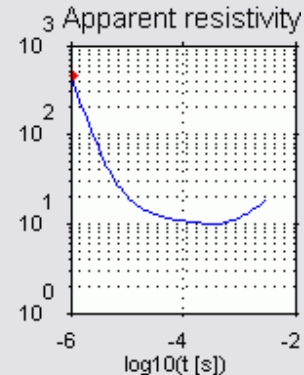
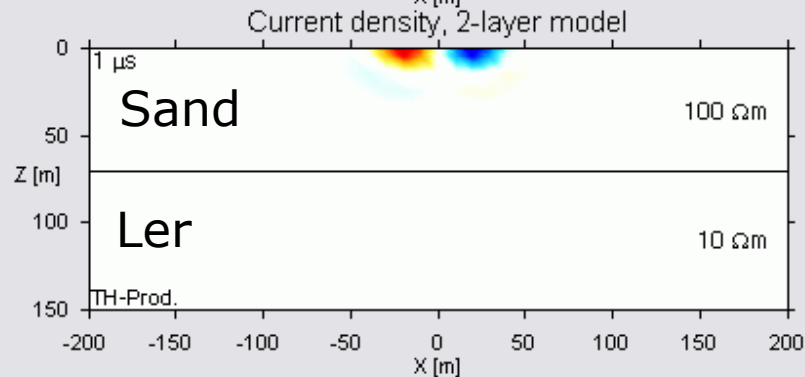
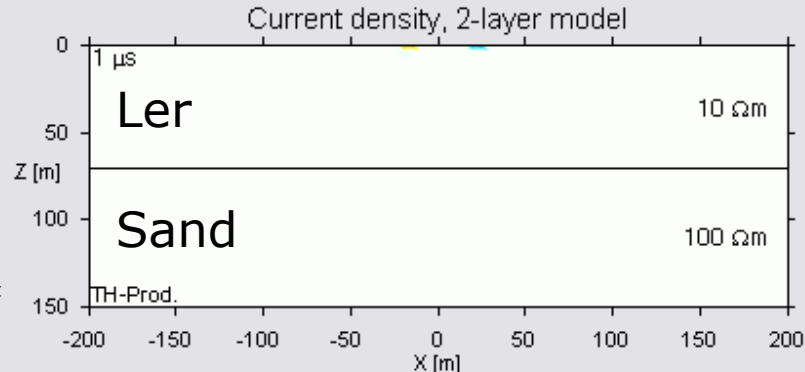
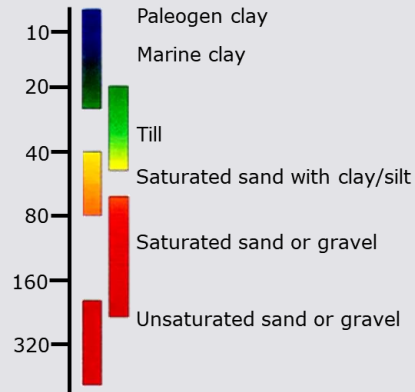


Elektromagnetiske metoder

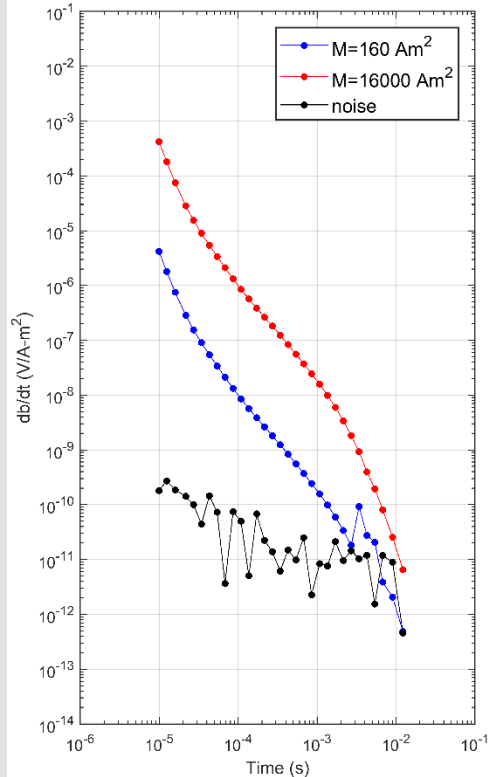


Current diffusion in the Earth

Resistivity of different geological units



Indtrængningsdybde



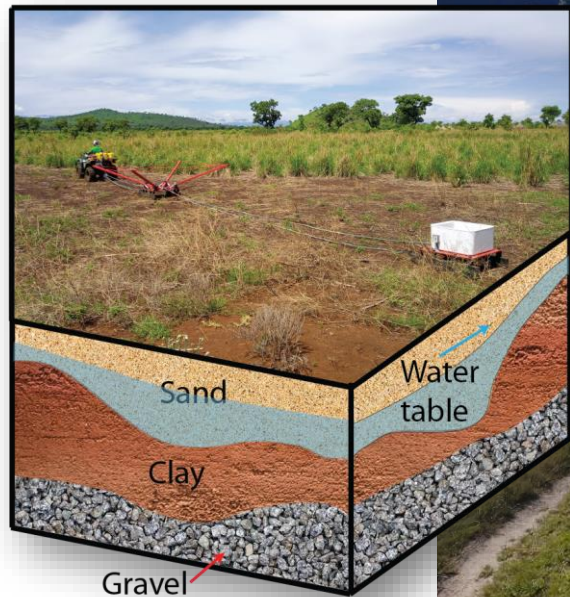
Typical Moment for Ground based and Airborne Systems

System	Max NIA (Am^2)
SkyTEM312	500,000
WalkTEM (40x40)	16,000
WalkTEM (100x100)	100,000
tTEM	240

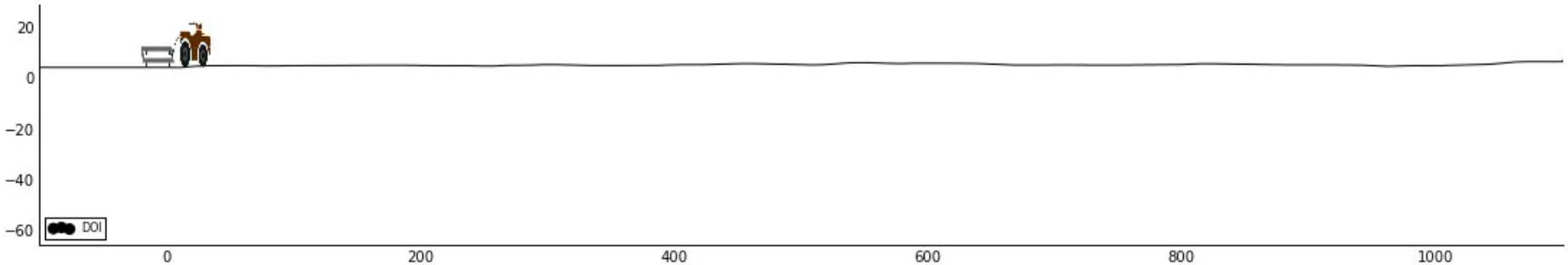




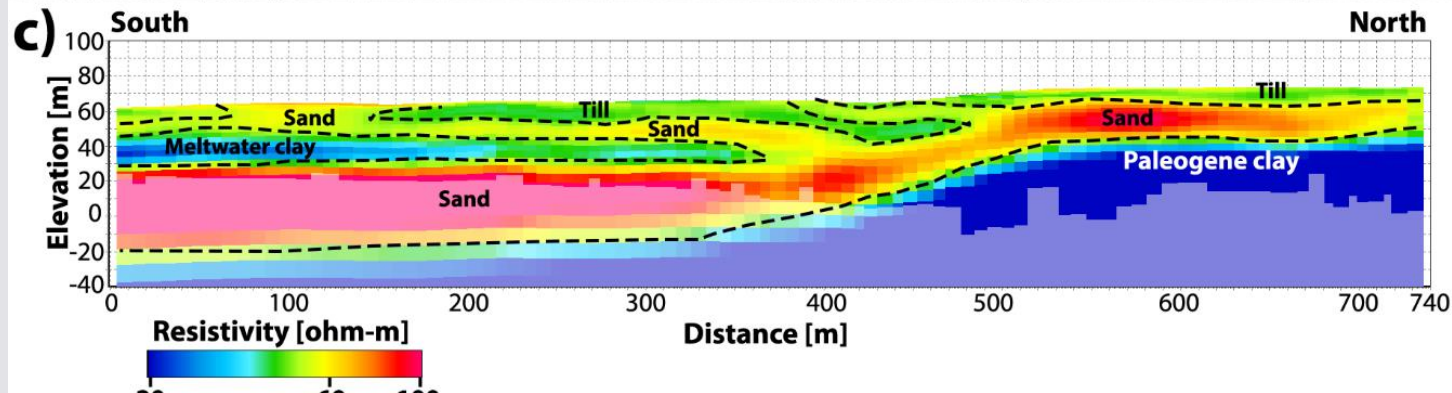
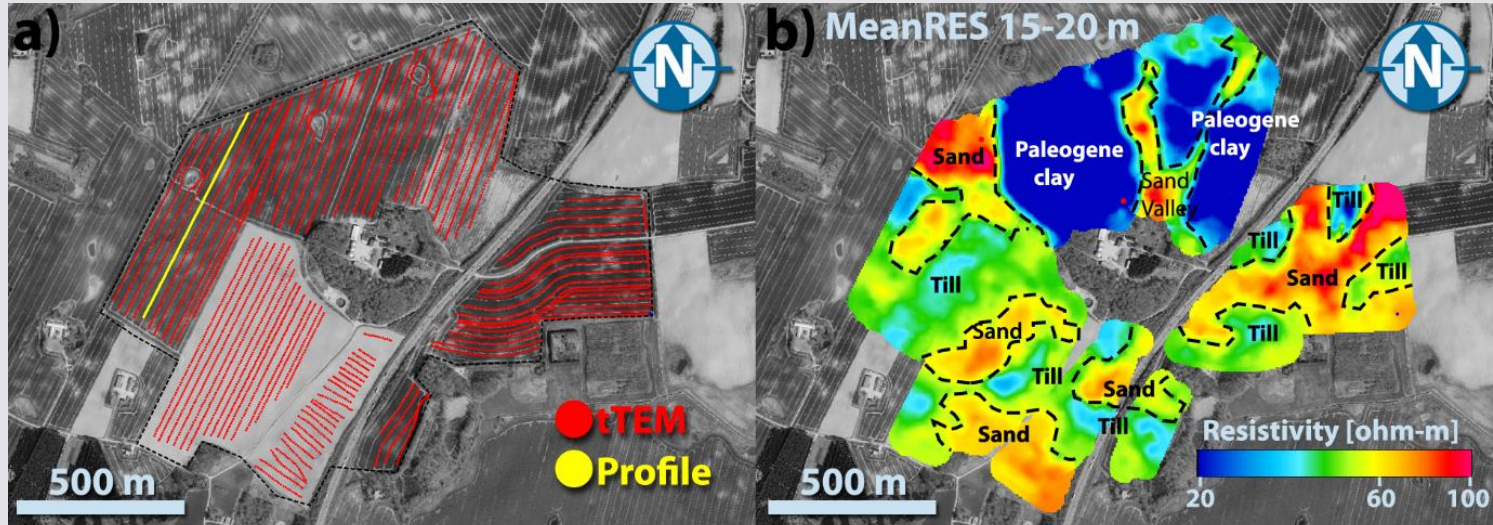
tTEM



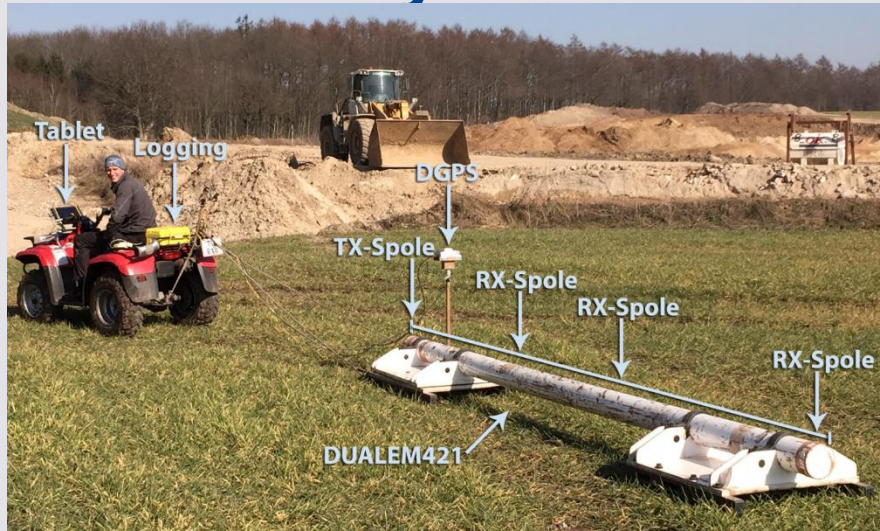
How does tTEM work? In the field..



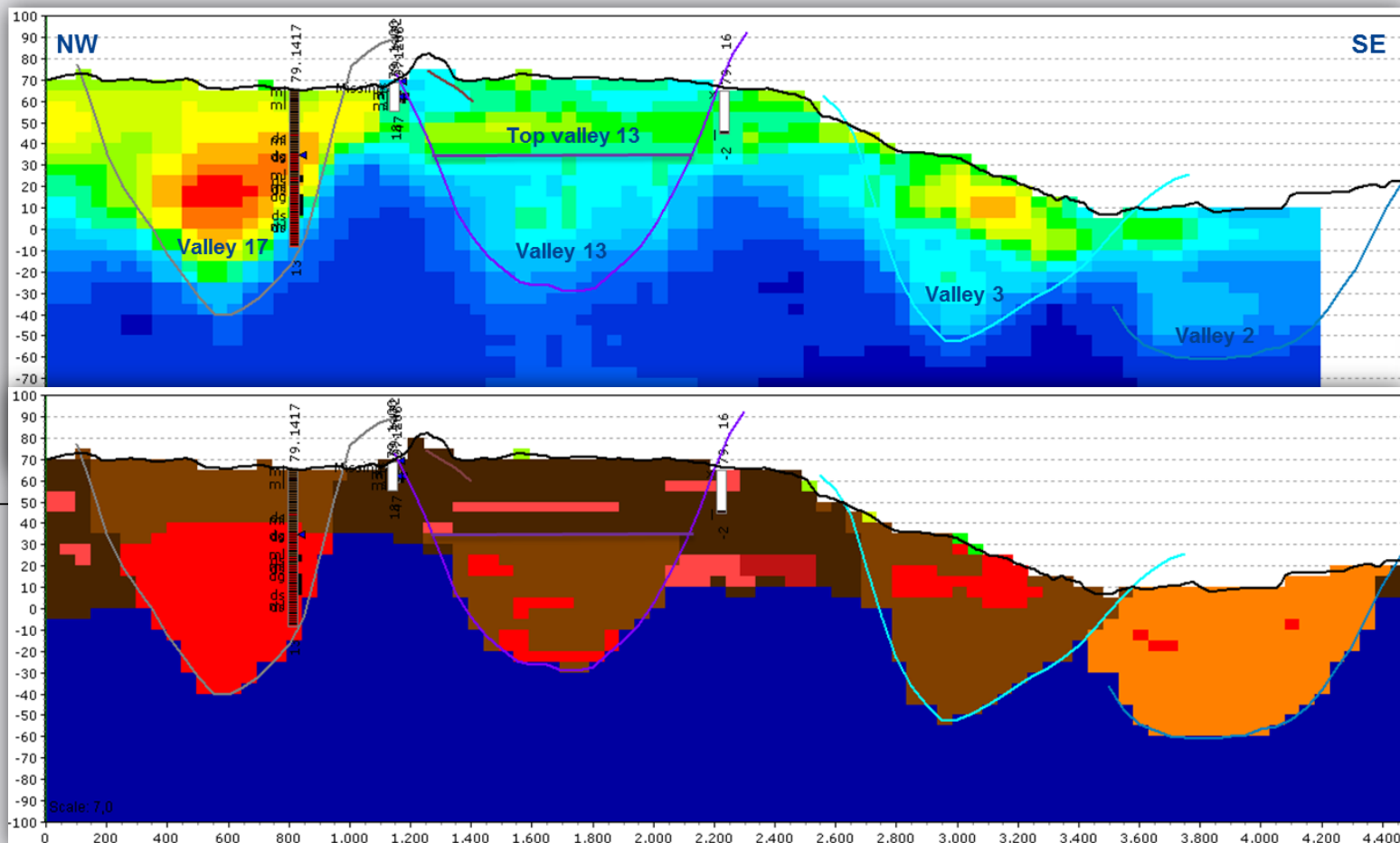
tTEM example



GCM – very shallow



Local scale detailed geological model



Pre-Quaternary:

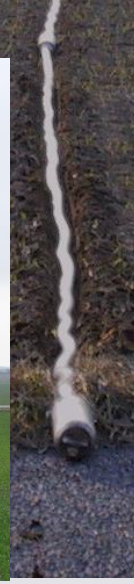
- Paleogene clay
- Miocene sand

Quaternary:

- Sand till
- Meltwater sand
- Clay till

Valley fill:

- Sand (meltwater-)
- Clay (till)
- Clay (meltwater-)



Brugen af georadar ved forureningsundersøgelser

Majken C. Looms Zibar, Lars Nielsen, Bolette
Badsberg Jensen, Espen B. Svendsen

KØBENHAVNS UNIVERSITET



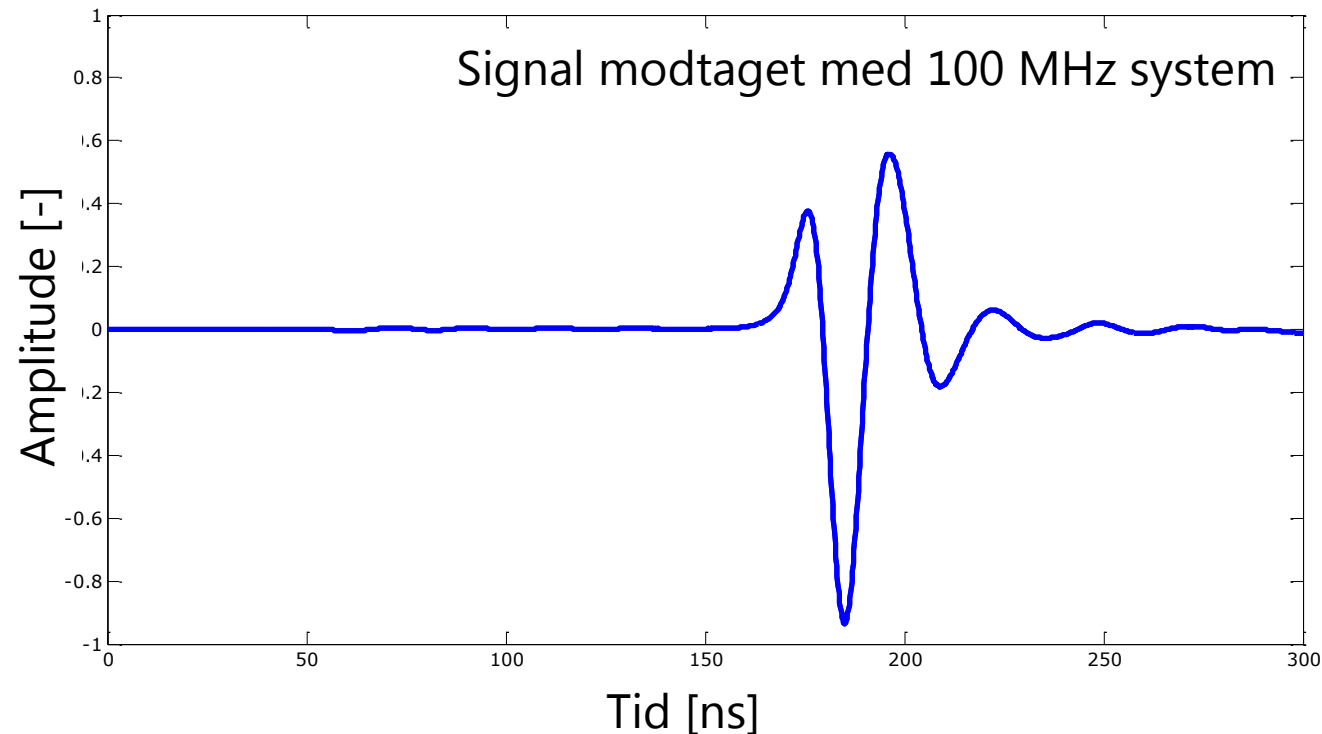
Georadar eller Ground Penetrating Radar (GPR)

Elektromagnetisk metode

- To antenner
- Sender en elektromagnetisk bølge afsted fra afsender antenne
- Registrerer ankommende signal ved modtager antenne

Forskellige setup af antenner

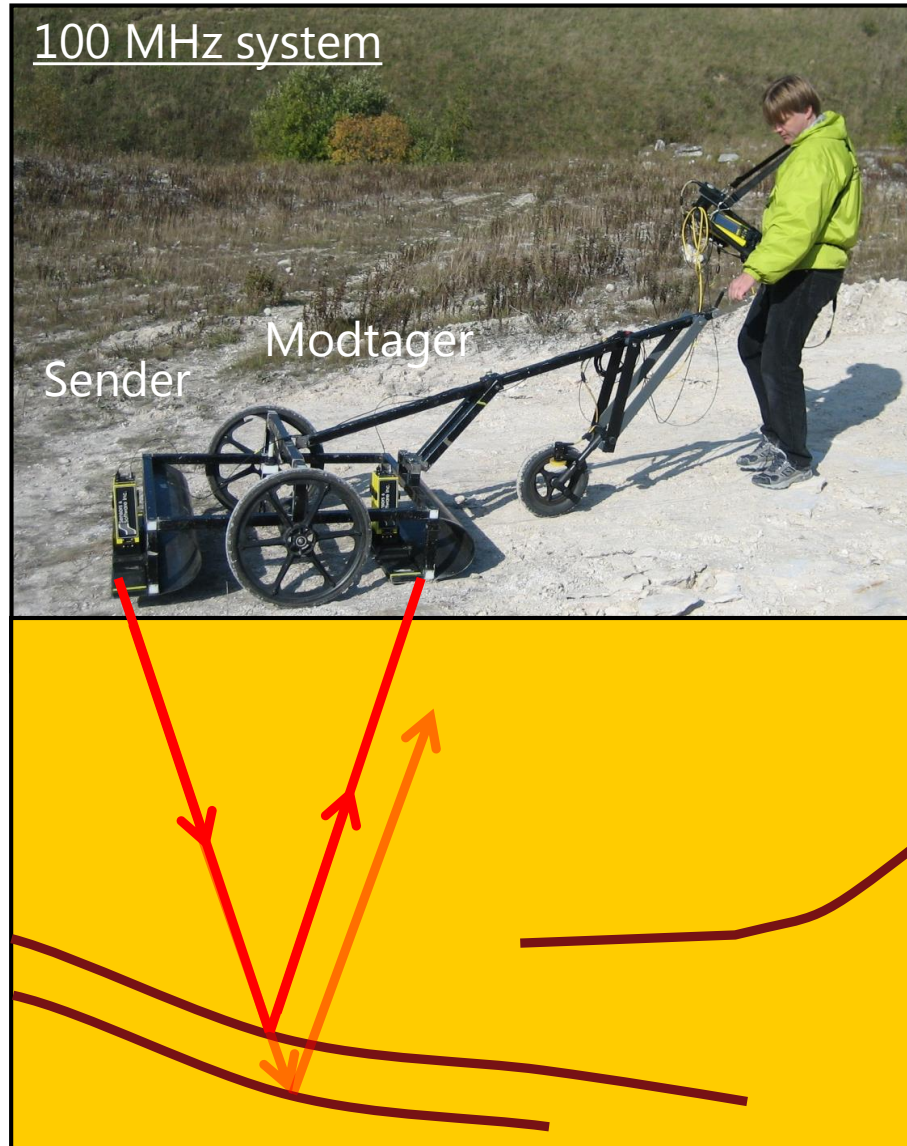
- Reflektionsgeoradar
- Borehulsgeoradar



Refleksions georadar

Noget af bølgen returneres ved ændringer i undergrunden:

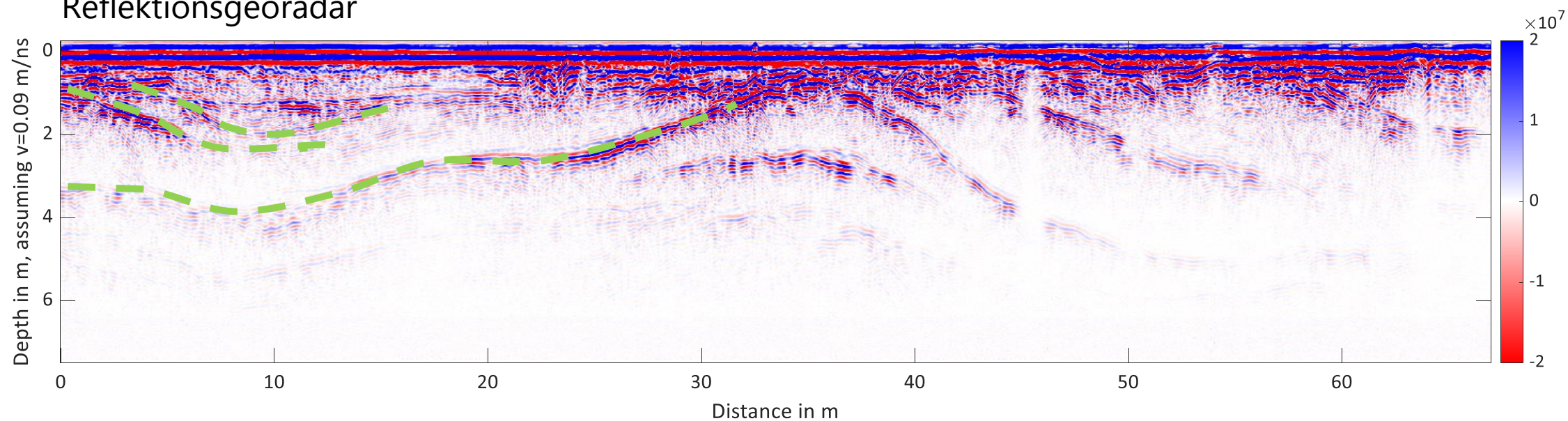
- Laggrænser
- Ændring i vandindhold
- Større sten
- Forurening?



Eksempel fra Boesdal kalkbrud



Refleksionsgeoradar



Refleksionsgeoradar ved forureningsundersøgelser

Fordele

- Nem og hurtig metode
- Ikke negativt påvirket af elektriske installationer

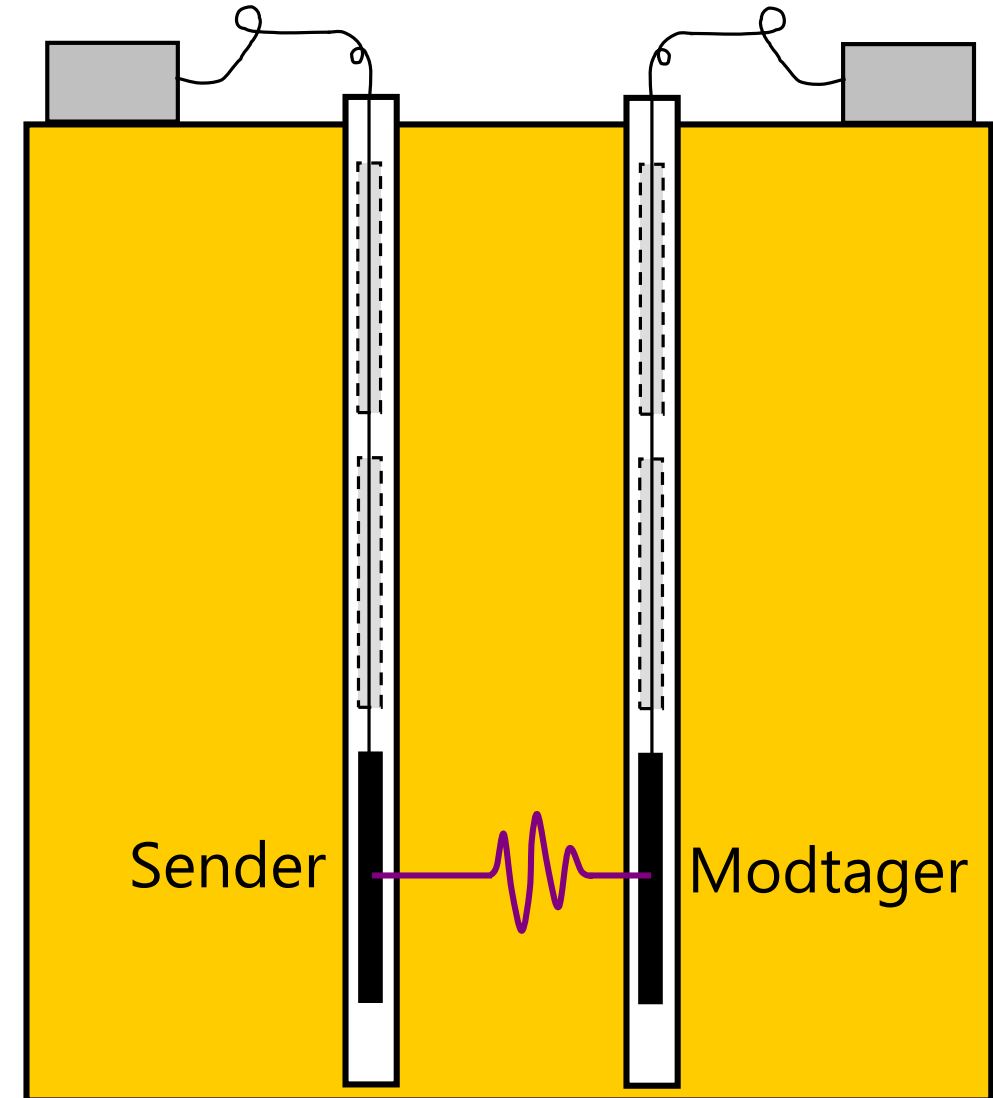
Ulemper

- Man får et billede af geologiens struktur, ikke hvad geologien består af
- Lav indtrængningsdybden ved lokaliteter med høj elektrisk ledningsevne

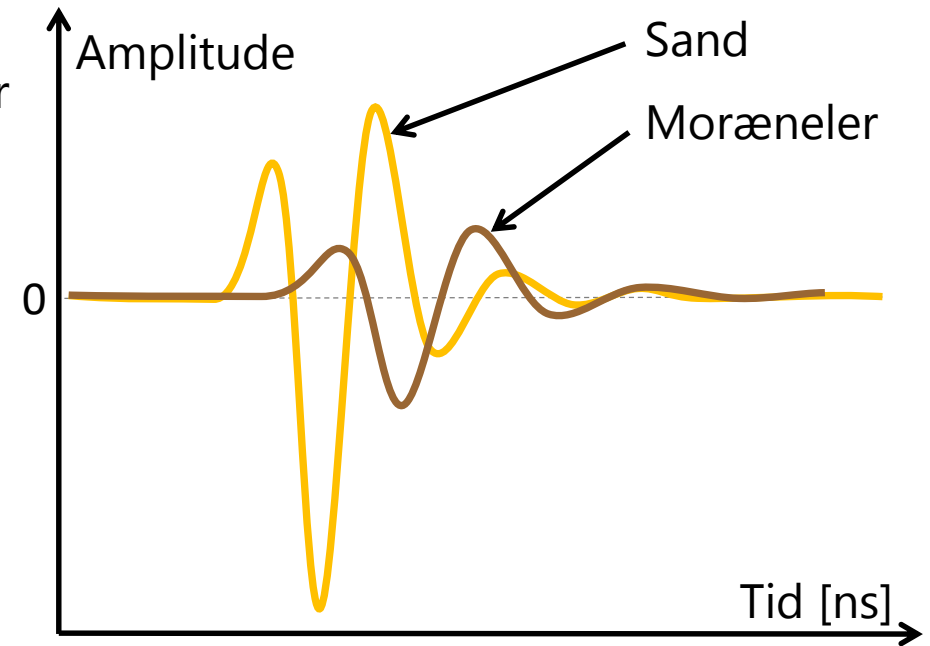
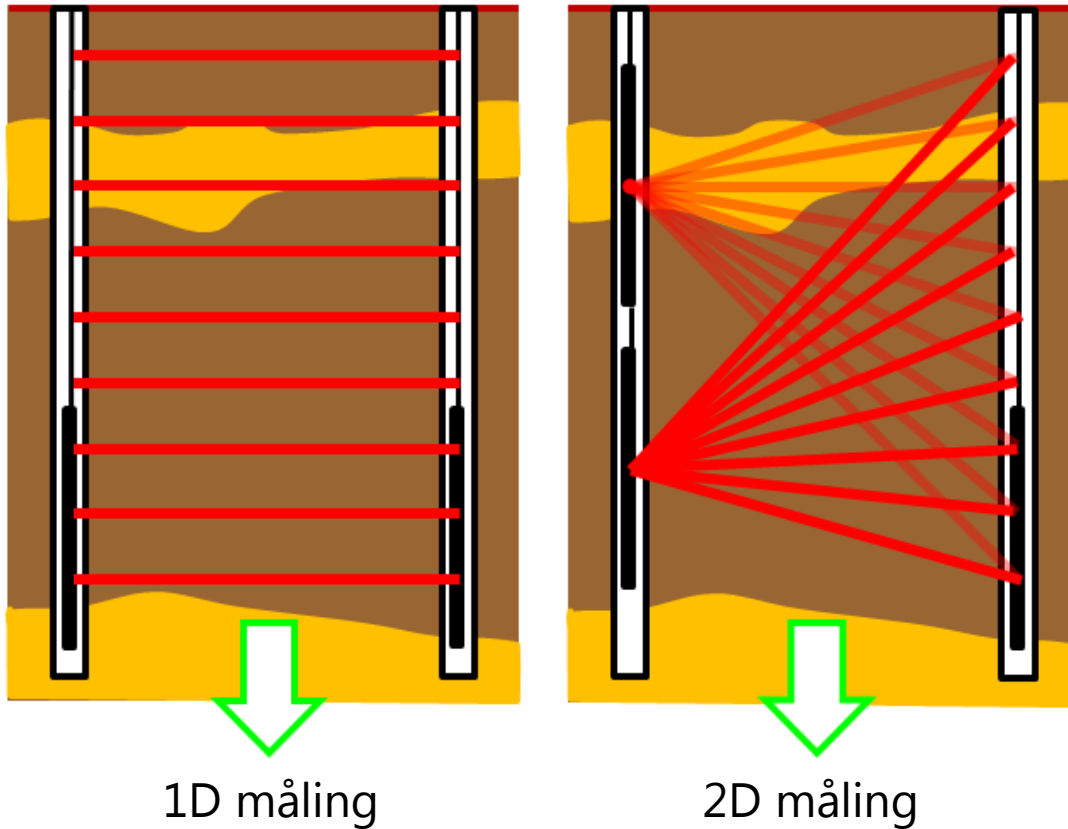
For sandede miljøer (250 MHz antenne)

- Indtrængningsevne: 5-10 meter
- Opløsningsevne: 10-20 cm

Borehulsgeoradar



Borehulsgeoradar



- Signalets ankomsttid/hastighed afhænger af vandindholdet
- Amplituden afhænger af den elektriske ledningsevne

Borehulsgeoradar ved forureningsundersøgelser

Fordele

- Nem og hurtig metode, opsættes på 15 min
- Ikke negativt påvirket af elektriske installationer
- Kan bruge eksisterende pejleboringer (ind. diameter > 40 mm)



Ulemper

- Afstanden mellem borehullerne kan maksimalt være 5-7 meter
- I det øverste 1-2 m er signalet påvirket af overfalden

Typisk ved brug af 100 MHz antenner

- Indtrængningsevne: 5-7 meter mellem boringer og ned til 30 m dybde
- Opløsningsevne: 10-20 cm

Geofysik for alle

Georadar til karakterisering af gulvkonstruktioner

Iben Langballe, Carsten Albrechtsen og Jørgen Ringgaard, Rambøll

Maria Hag og Mads Møller, Region Hovedstaden

ATV Vintermøde

Tirsdag den 7. marts 2023

Kan vi anvende geofysik til kortlægning af gulvkonstruktioner?



Potentialer for metoden:

- Kortlægning af gulvkonstruktion og rørføringer i hele bygningens fodaftryk
- Forbedre grundlag/sikkerhed i risikovurderinger i undersøgelser
- Forbedre grundlaget for dimensionering og etablering af afværgeforanstaltninger til sikring af indeluft

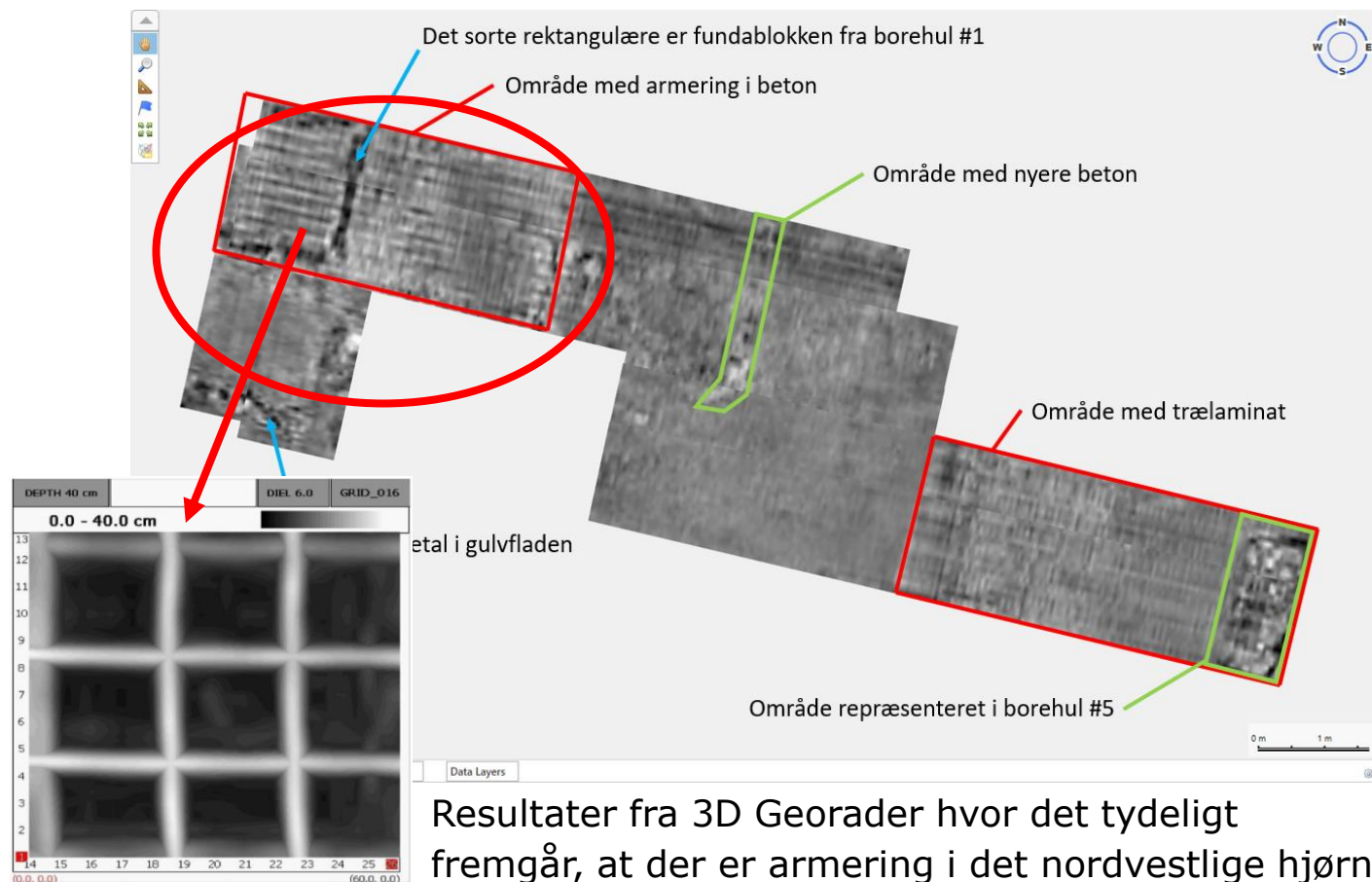
Kendt teknologi i ny konstellation:

- Udendørs kortlægning af vejopbygning - nu kortlægning af gulvkonstruktioner

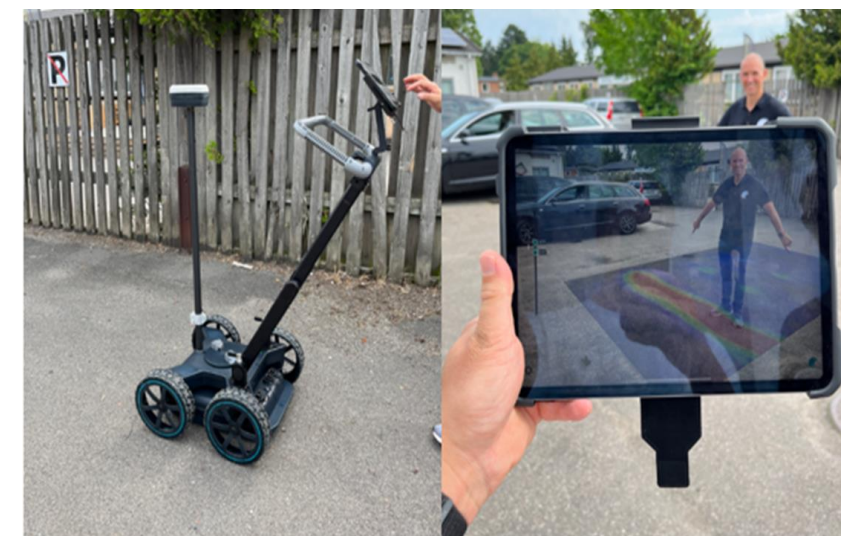
Udfordringer og spørgsmål?

- Kan vi bruge metoden indenfor – forstyrrelser fra jern og el?
- Hvad kan vi se med metoden - betontykkelse, armering, fundamenter, rør, isolering, kapillarbrydende lag etc.?

Resultater - Innovationsgaragen



StructureScan Mini, med tydeligt armeringsnet med maskestørrelse og tykkelse af armeringsjern



Konklusion

- Teknologien kan anvendes indenfor i bygninger med el og jern
- Vi kan kortlægge **tykkelsen af betongulvet** på cm/millimeter niveau under **hele bygningens fodaftryk**
- Vi kan kortlægge, om der er **armering** i gulvet
- Vi kan kortlægge **maskestørrelse og tykkelse af armeringsnet**
- Vi kan kortlægge **tværgående fundamenter** gennem bygninger
- Vi kan kortlægge **rør i eller under gulvkonstruktionen**

Potentialer for udbytte:

- **Undersøgelser:** Forbedre grundlaget/sikkerhed i risikovurdering i forhold til indeluft i undersøgelser. Kortlægge kloakføringer!
- **Afværge:** Forbedre grundlaget for dimensionering og etablering af indeluft afværgeforanstaltninger

Vil du vide mere: Teknisk indlæg v/ geolog Carsten Albrechtsen, Rambøll onsdag 10:50-11:15
spor 4, Indeluft – måleteknikker

Vintermøde, 6.-8. marts 2023

Fagsession – Geofysik for alle



Region Syddanmark

Seismik anvendt ved losseplads, Odense Vest

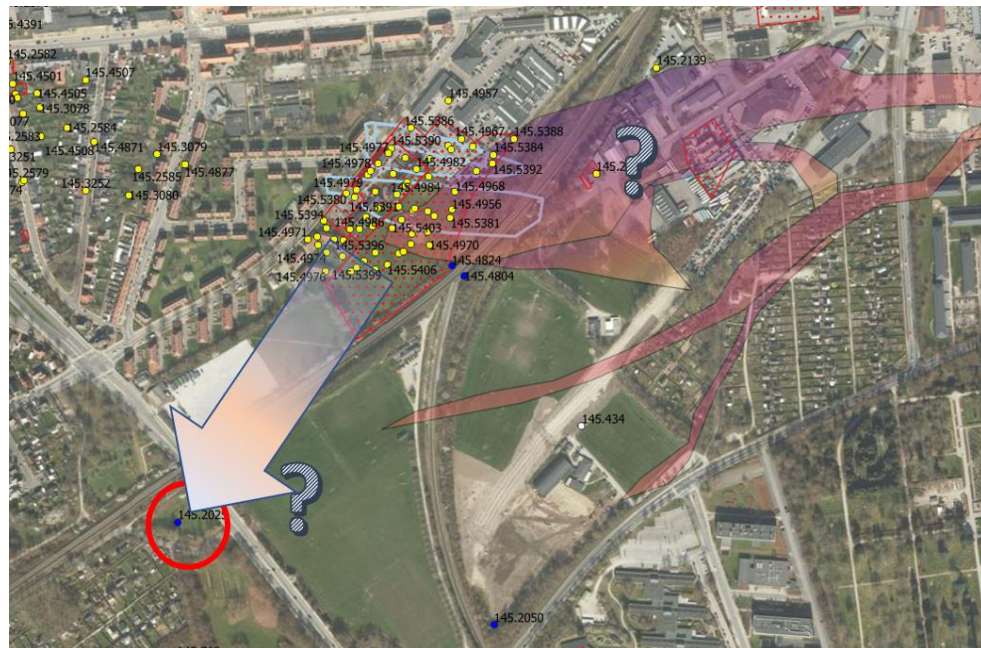
Agnieszka T. Bentzen, geolog, Region Syddanmark, Afdeling Vand og Jord



Problemet?

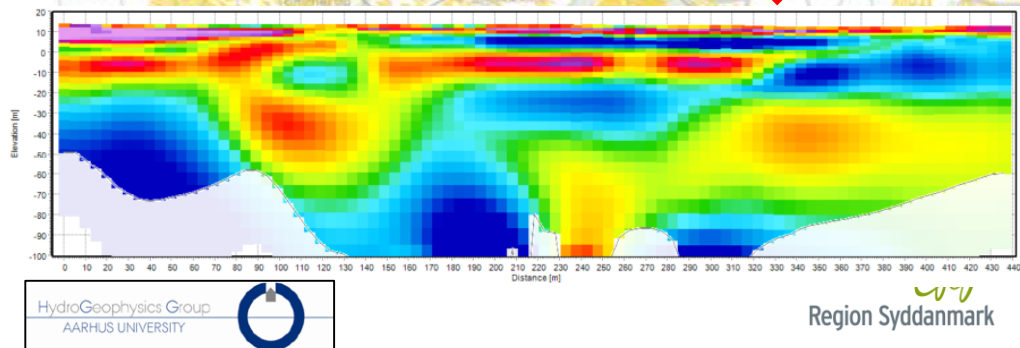
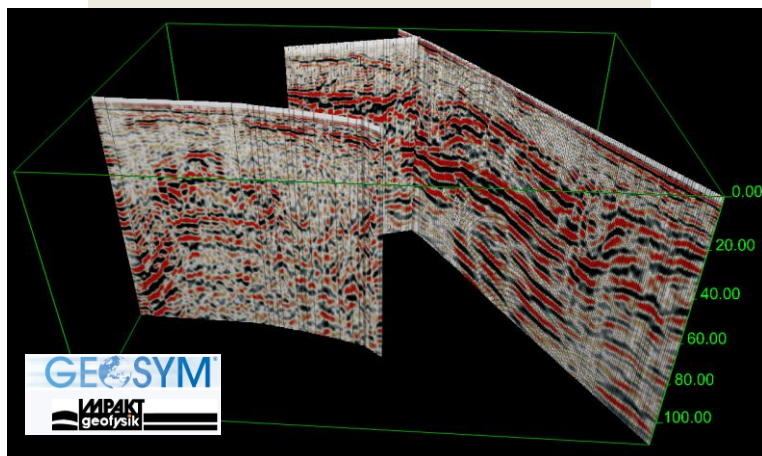
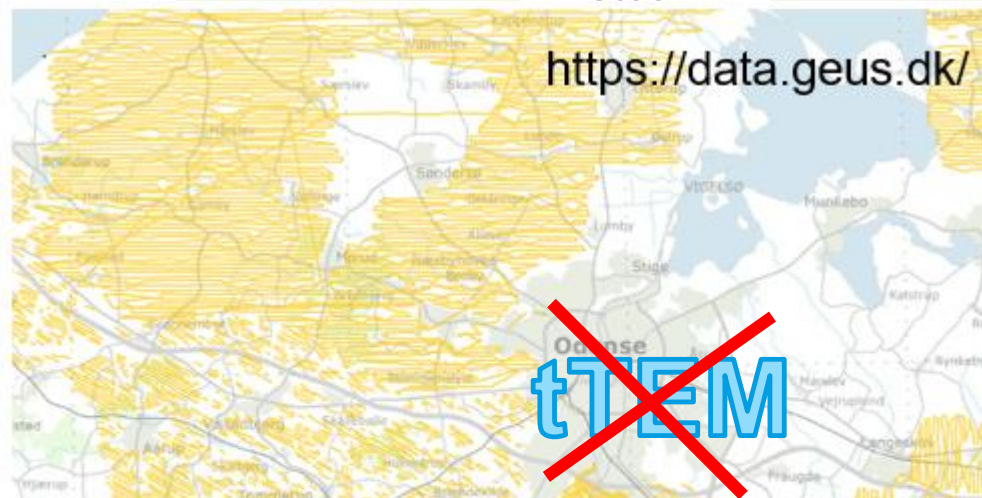
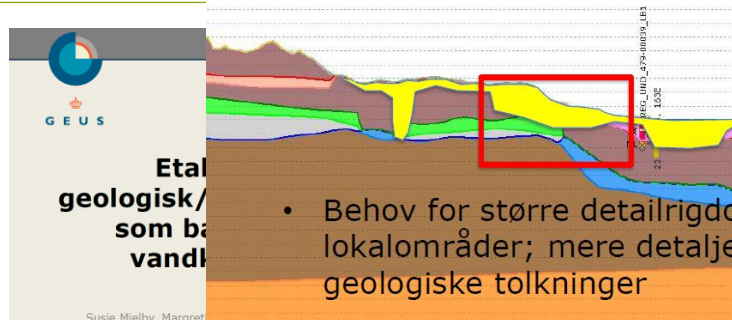
Side 2

- Spredning af forurening skal bestemmes
- Undergrunden i byområder kan være kompliceret: geologi og antropologi
- Klimaforandringer: hvordan påvirker de spredning af forurening?
- Er vores risikovurderinger klimarobuste?
- Klimatilpasningsprojekter i byen: hvordan påvirker de forurening?

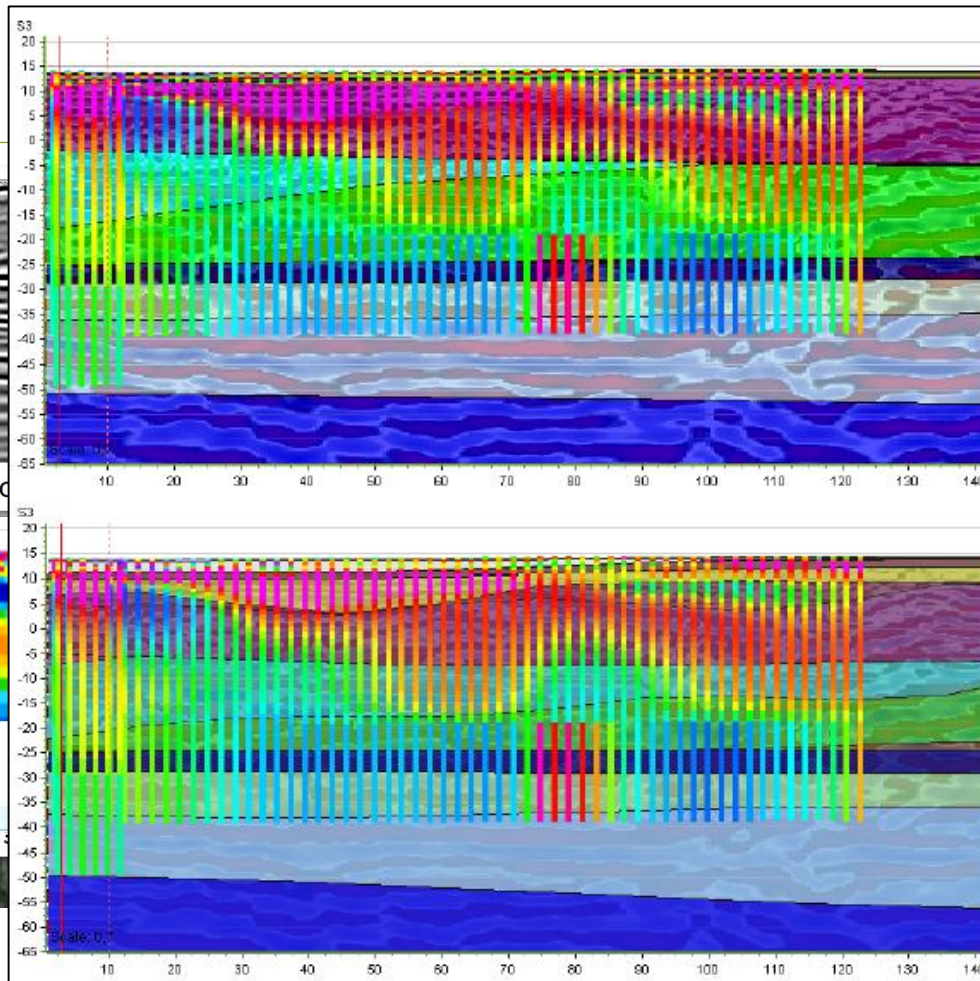
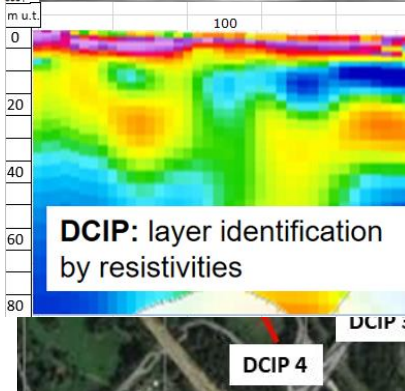
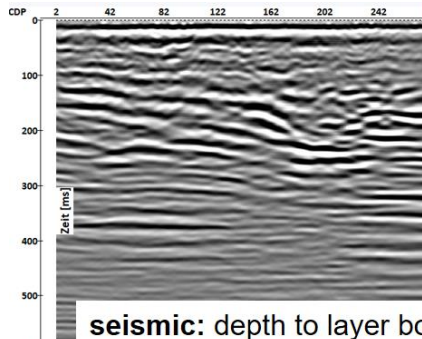


Metode

Side 3



Resultater





Tak for opmærksomhed

a.bentzen@rsyd.dk

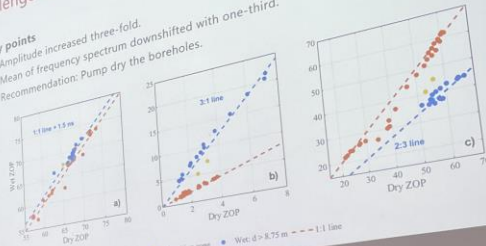
Cross borehole georadar til forbedring af geologisk model

Katerina Tsitonaki, WSP Denmark

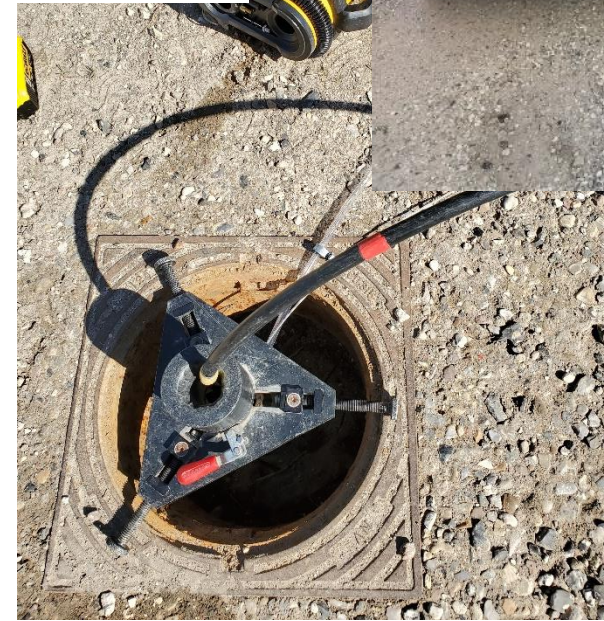
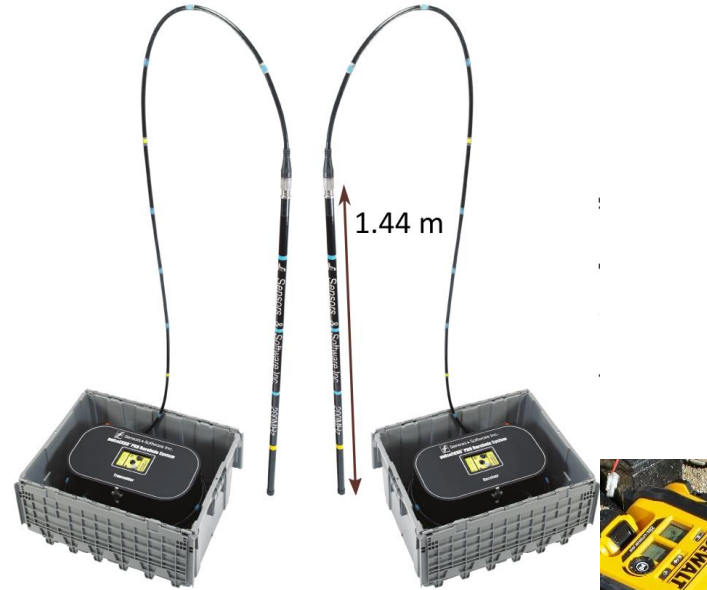
På skulderne af Bolette Badsbjerg Jensen

Challenge: Water in Boreholes (Paper II)

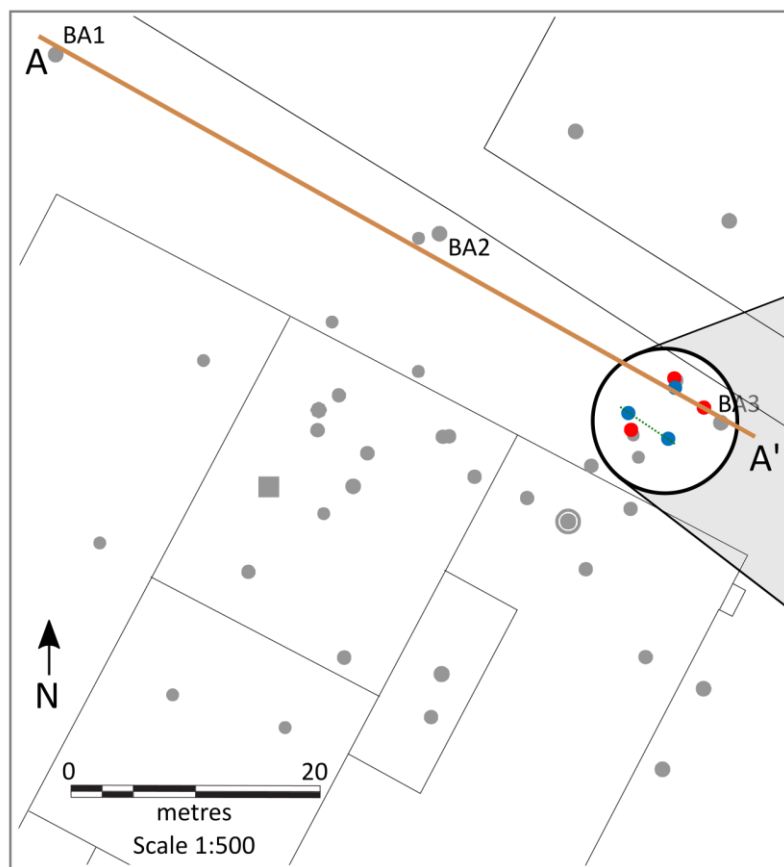
- Key points
 - Amplitude increased three-fold.
 - Mean of frequency spectrum downshifted with one-third.
 - Recommendation: Pump dry the boreholes.



Kan vi bruge Cross Borehole
Georadar på
forureningsundersøgelser for at
kortlægge geologiske
heterogeniteter, sandslirer mm?
Det ultimative mål er bedre
konceptuelle modeller til bedre
forståelse af forureningsspredning

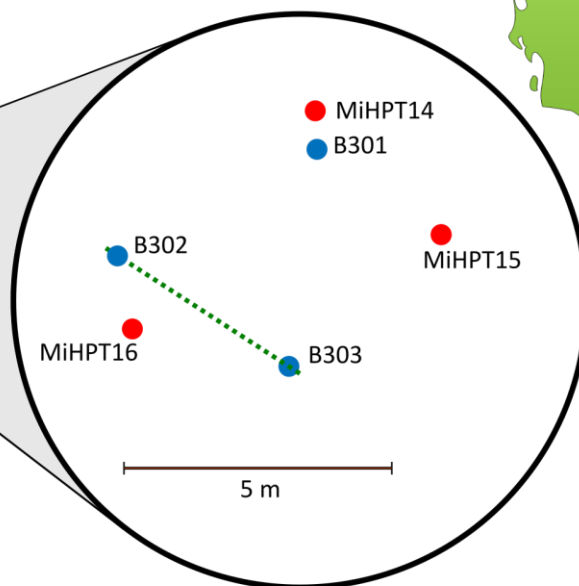


Feltarbejde

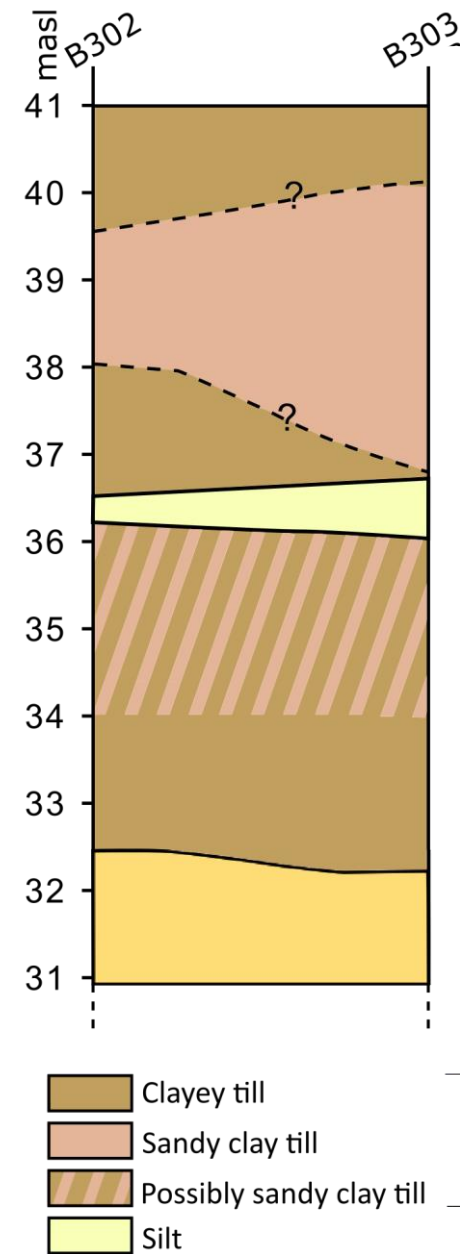


- Boreholes
- MiHPT logs
- GPR transect

NIRAS og DTU

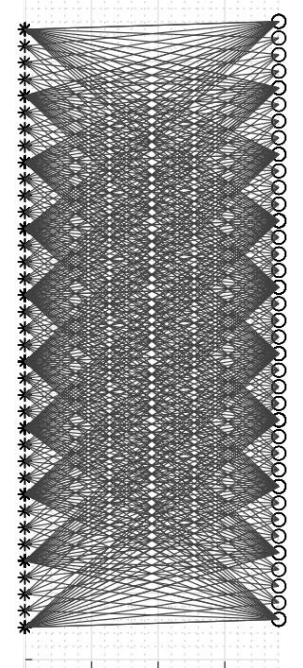
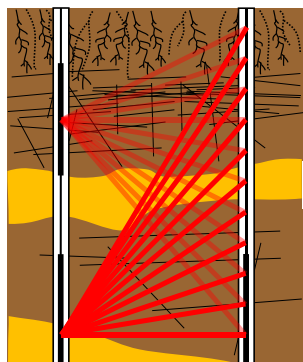


- Et lille område ca. 5x5 meter.
- 2-3 dages feltarbejde efterfulgt af 2-7 dages processering af profiler.



wsp

Når man sætter alt sammen får man en forfinet og mere robust geologisk model



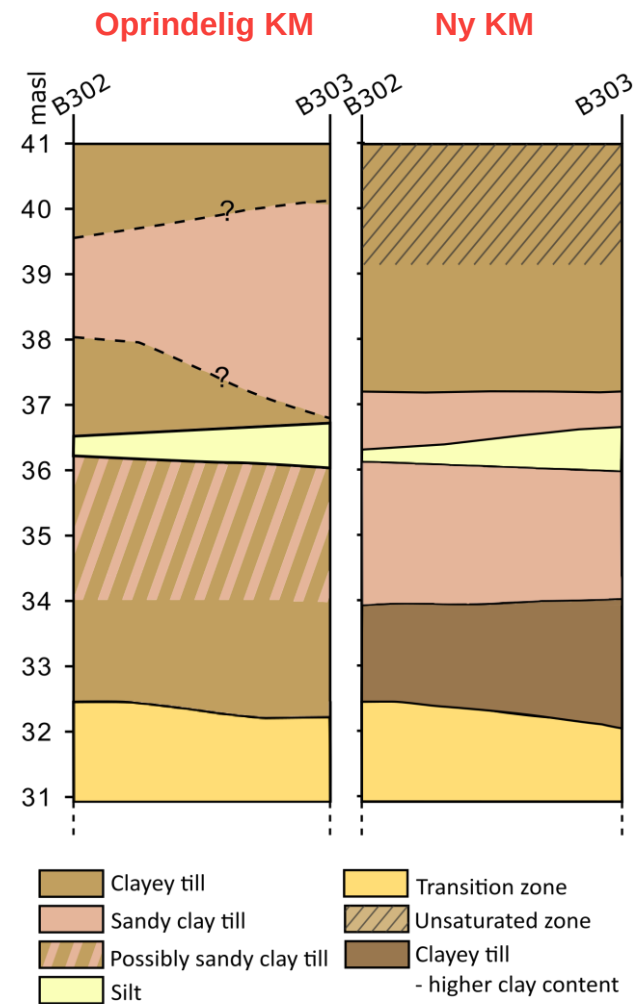
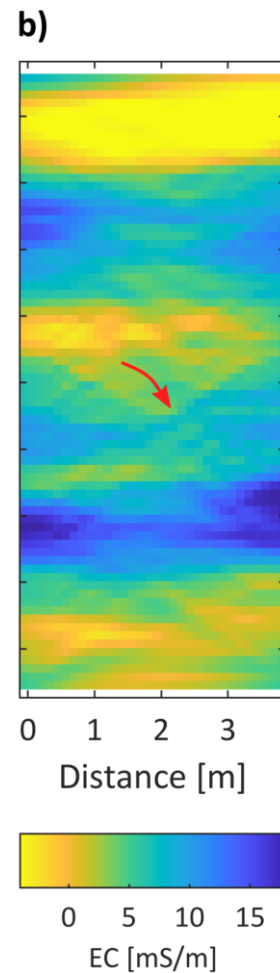
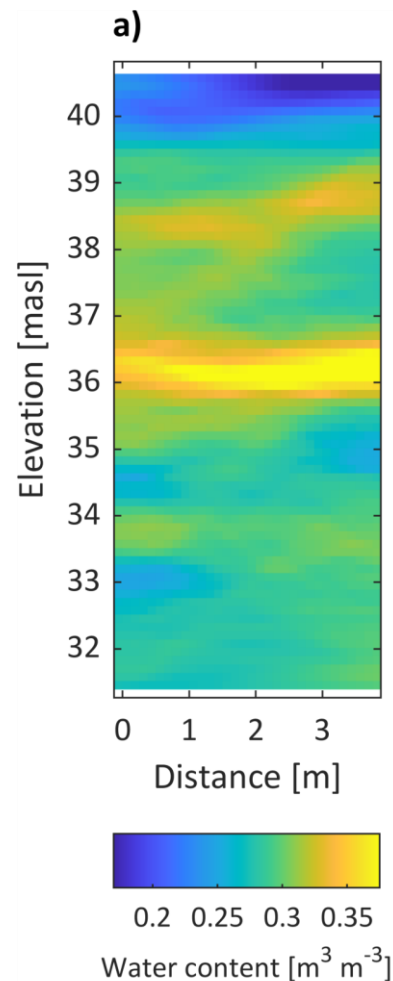
0 1 2 3
Distance [m]

2023

Geophysical
inversion

Travelttime data
➤ Water content

Amplitude data
➤ Electrical
conductivity

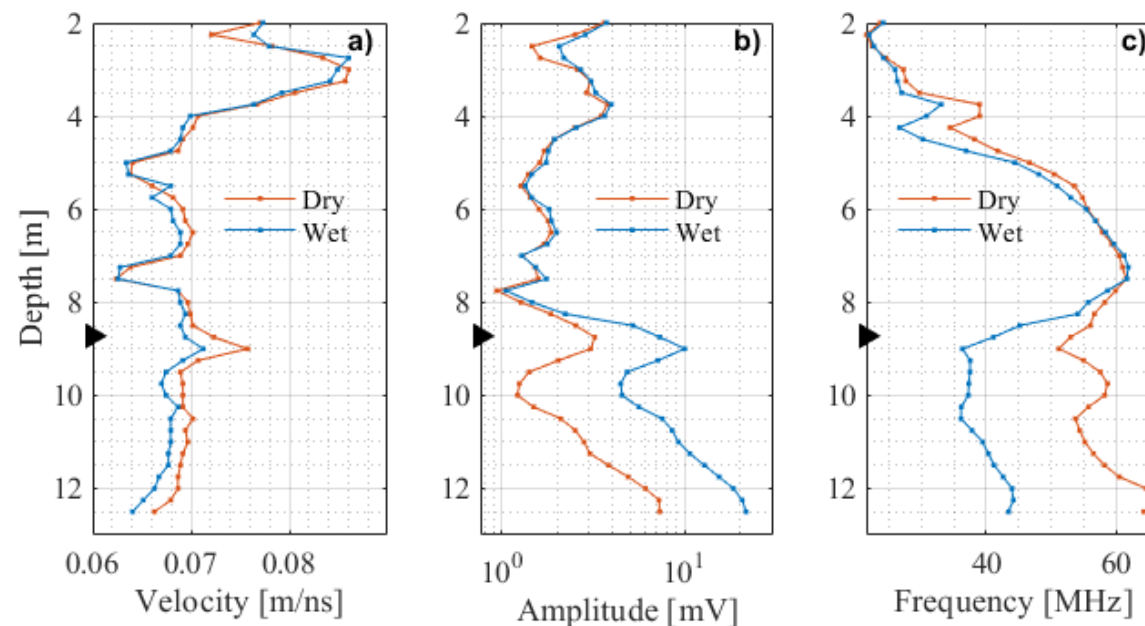


Udbytte og opmærksomhedspunkter

- Data fra GPR forfinede det geologiske model
- Høj opløsning
- Metoden er nem at bruge i feltet, hurtig og kompakt og kan bruges på eksisterende borer
- Andre installationer påvirker ikke metoden

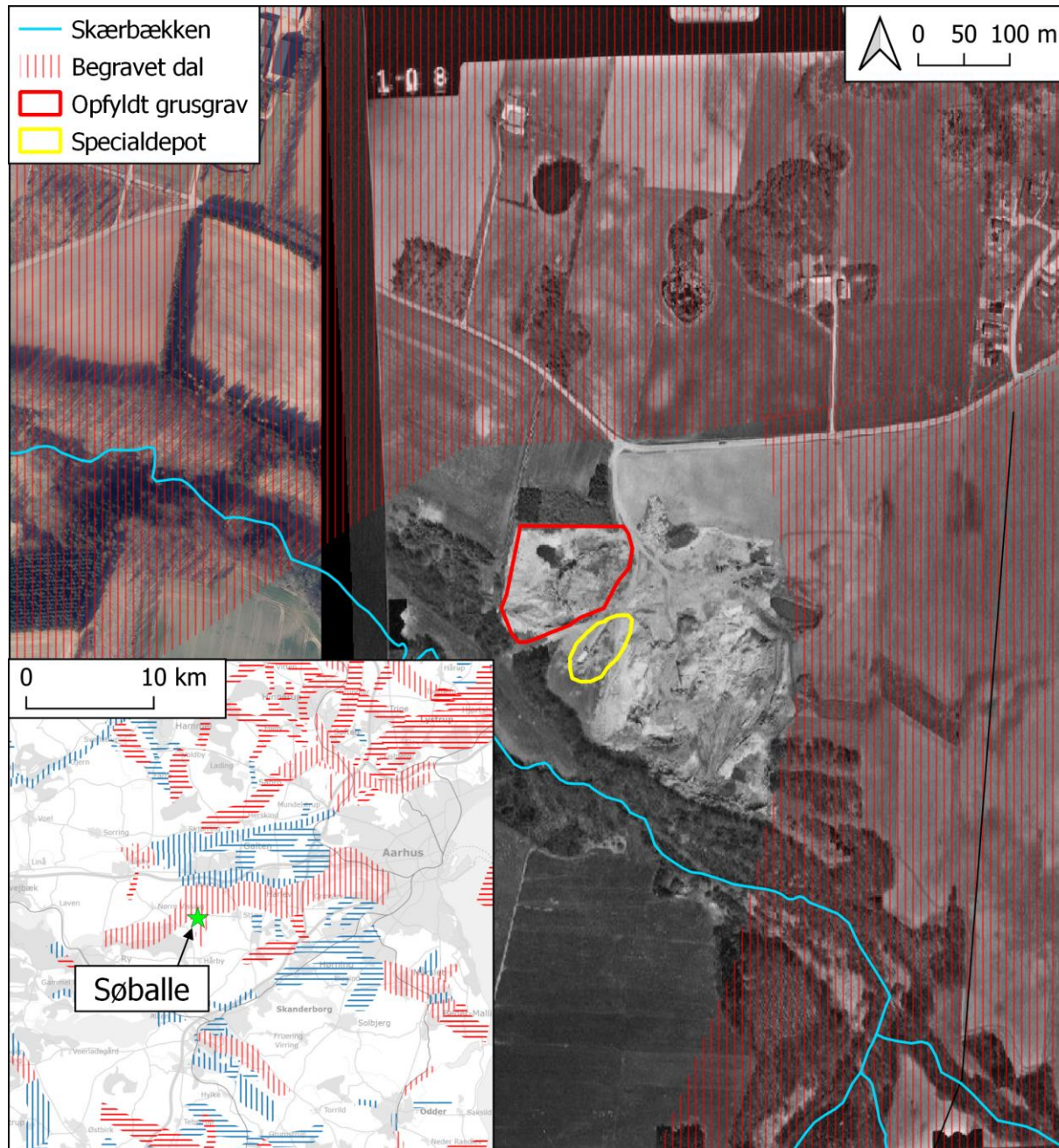
OPMÆRKSOMHEDSPUNKTER

- Kræver tørpumpning af borerne
- Lige nu er databehandling stadig tids- og specialistvidenkrævende, omend det er blevet meget hurtigere med den nye algoritme fra Badsberg et al., 2022..
- Er stadig begrænset af at afstand mellem borerne skal være ca. 5 meter
- **Derfor ser vi metoden at have en potentiale på lokaliteter med komplekse geologier, hvor det er vigtigt at kortlægge orientering og konnektivitet mellem sandslirer**



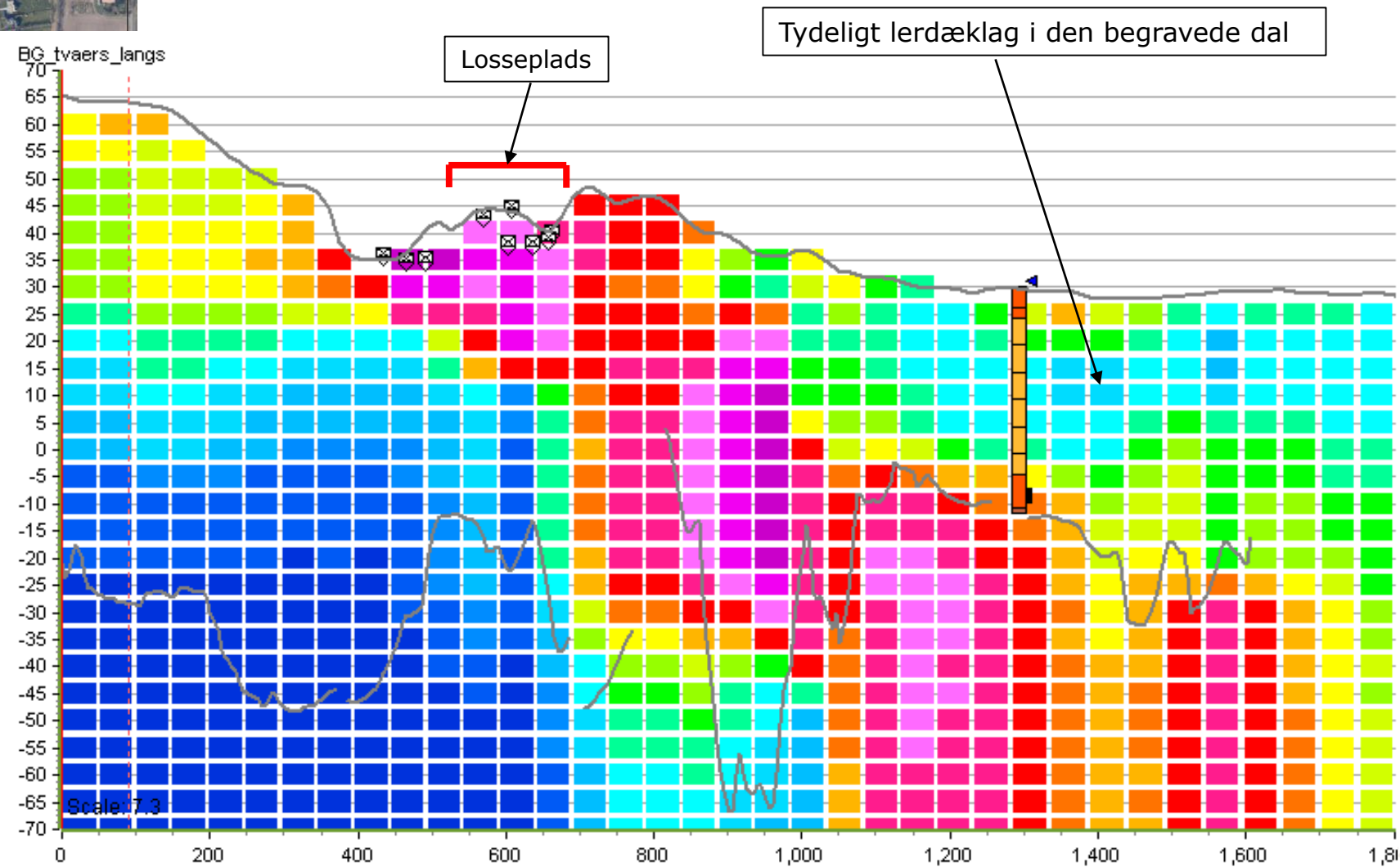
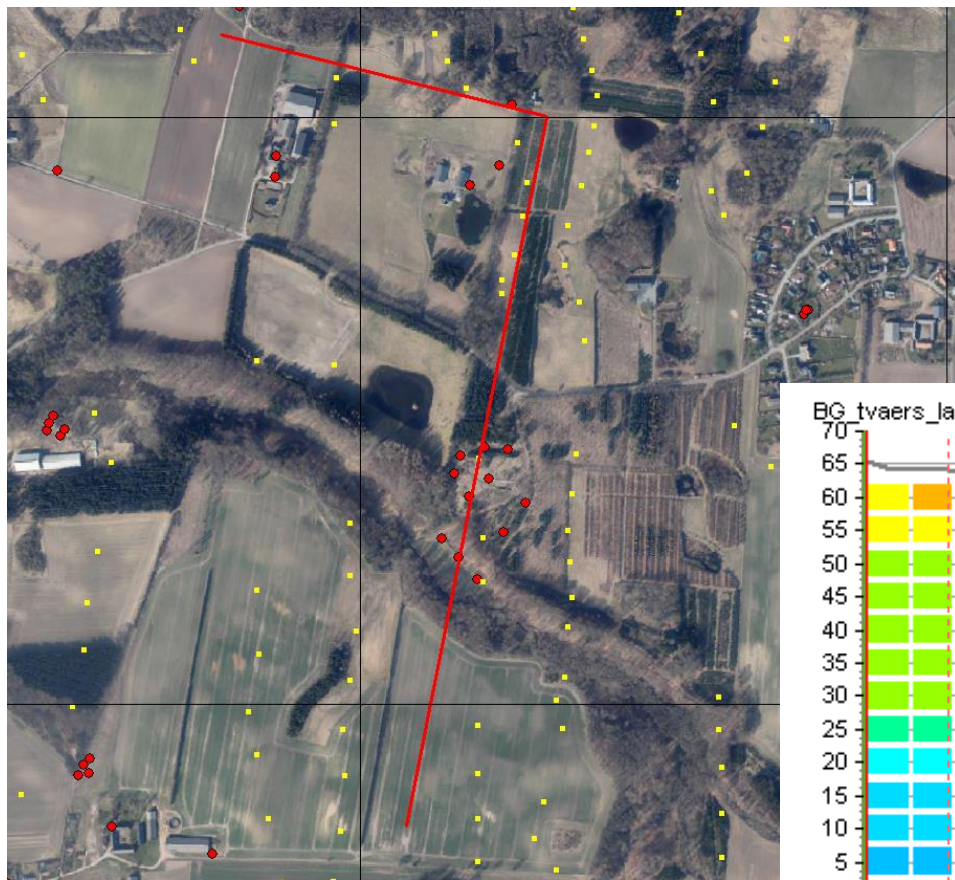


tTEM-kortlægning af en PFAS-lokalitet ved Søballe
v/ Thomas Ljungberg, Region Midtjylland

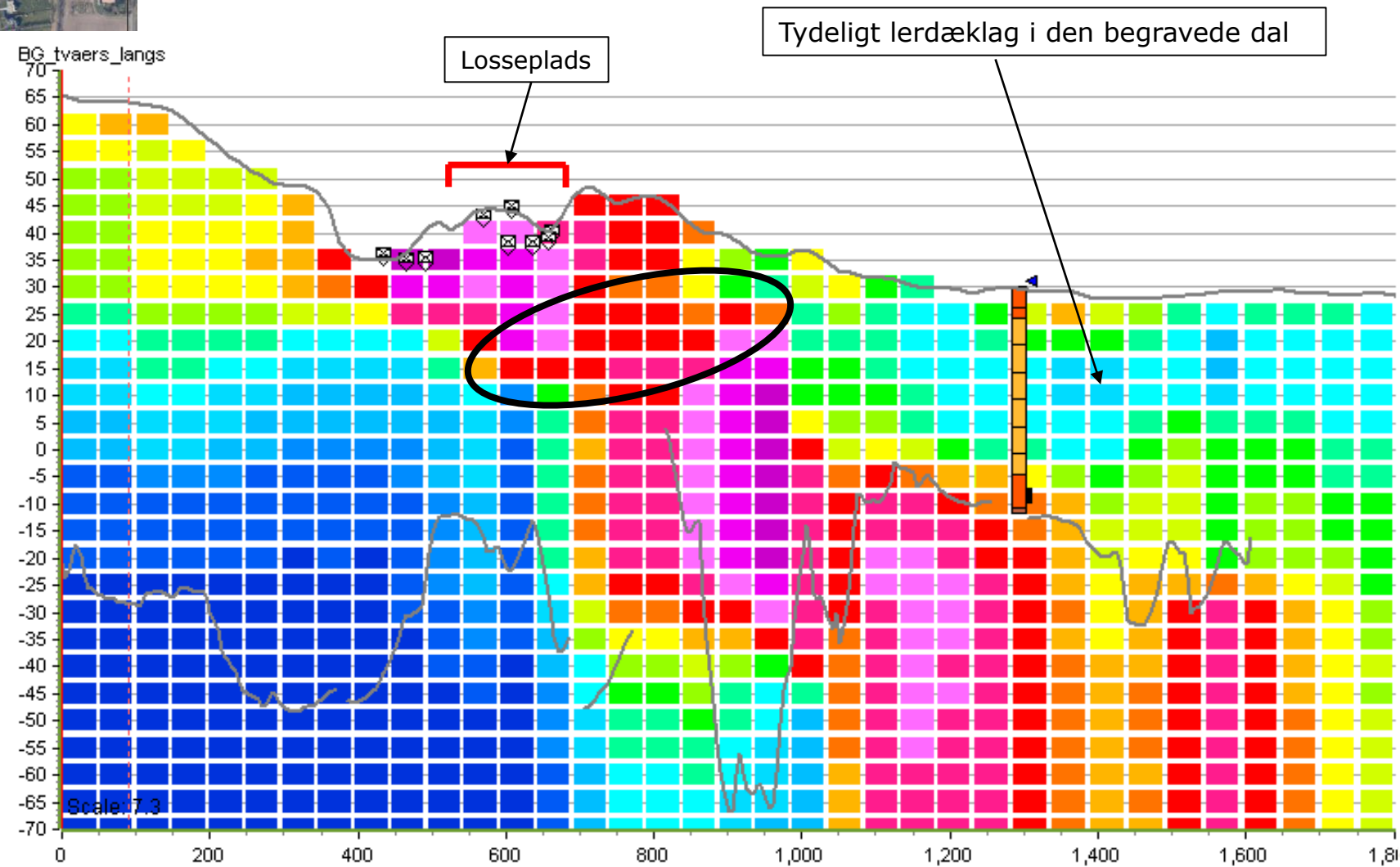
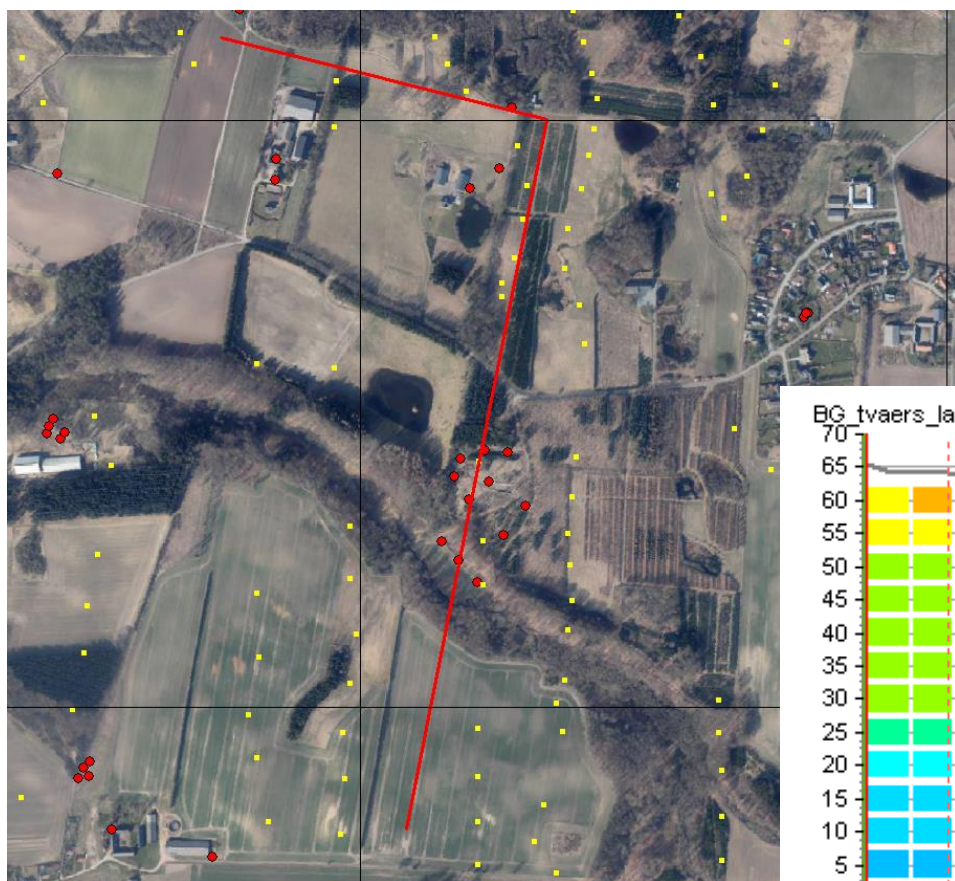


- Tæppefabrikken WESTON har i 1970'erne deponeret tæpperester og latex-slam både direkte i grusgraven og i støbte gruber.
- Ved indledende undersøgelse i 2019 er der påvist op til $9,6 \mu\text{g/l}$ $\Sigma 4$ og $52 \mu\text{g/l}$ $\Sigma 22$ i terrænnært grundvand.
- Grundejer oplyser at grusgravningen blev stoppet da man nåede et lerlag.

SkyTEM undersøgelse



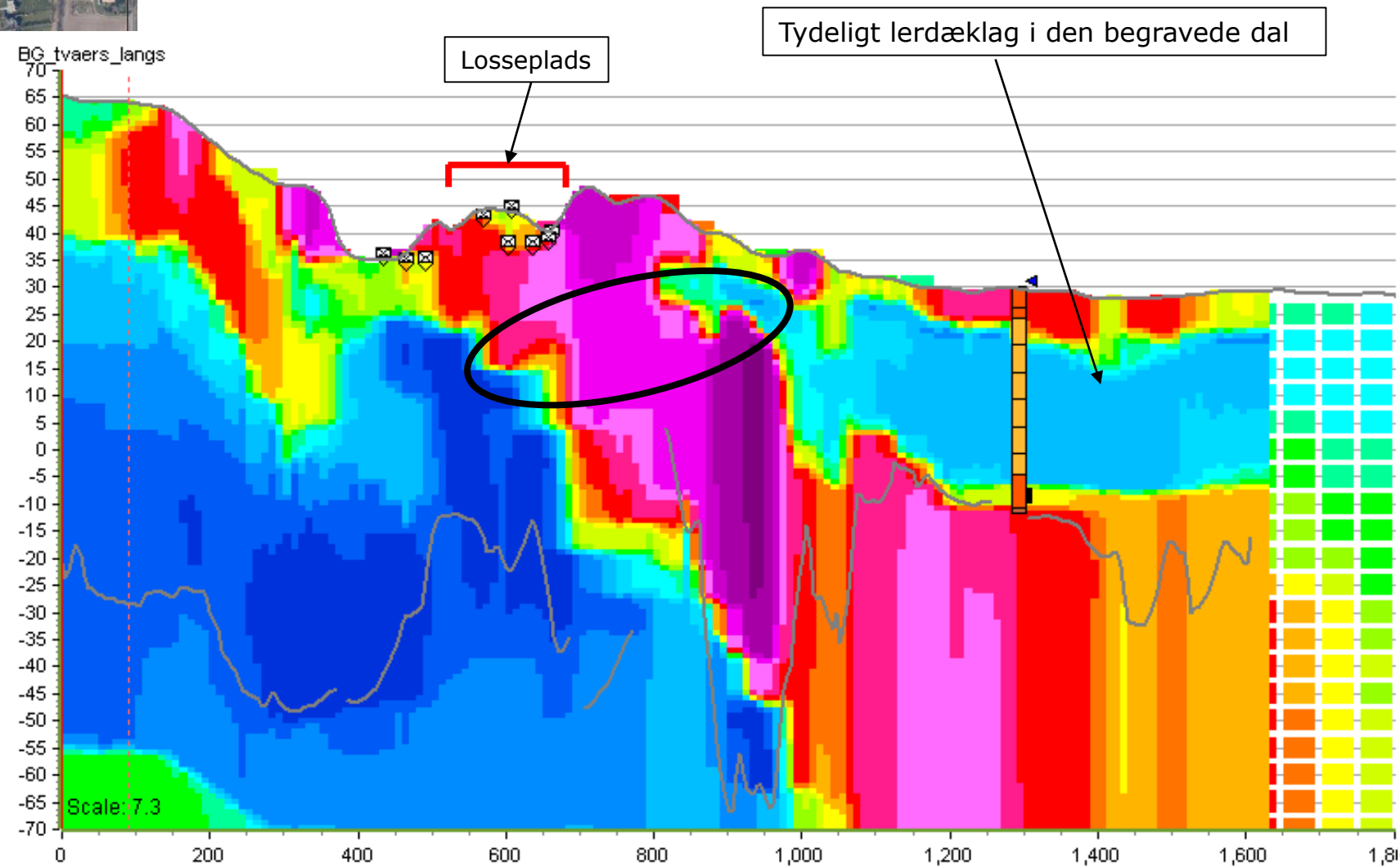
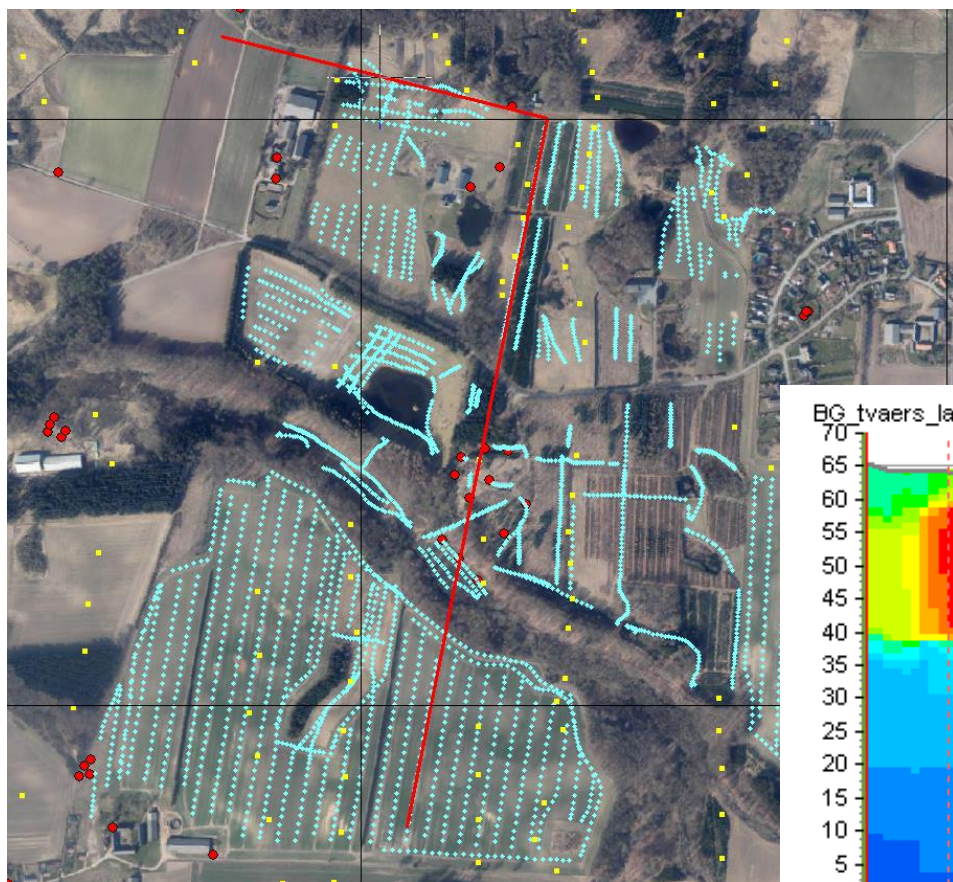
SkyTEM undersøgelse

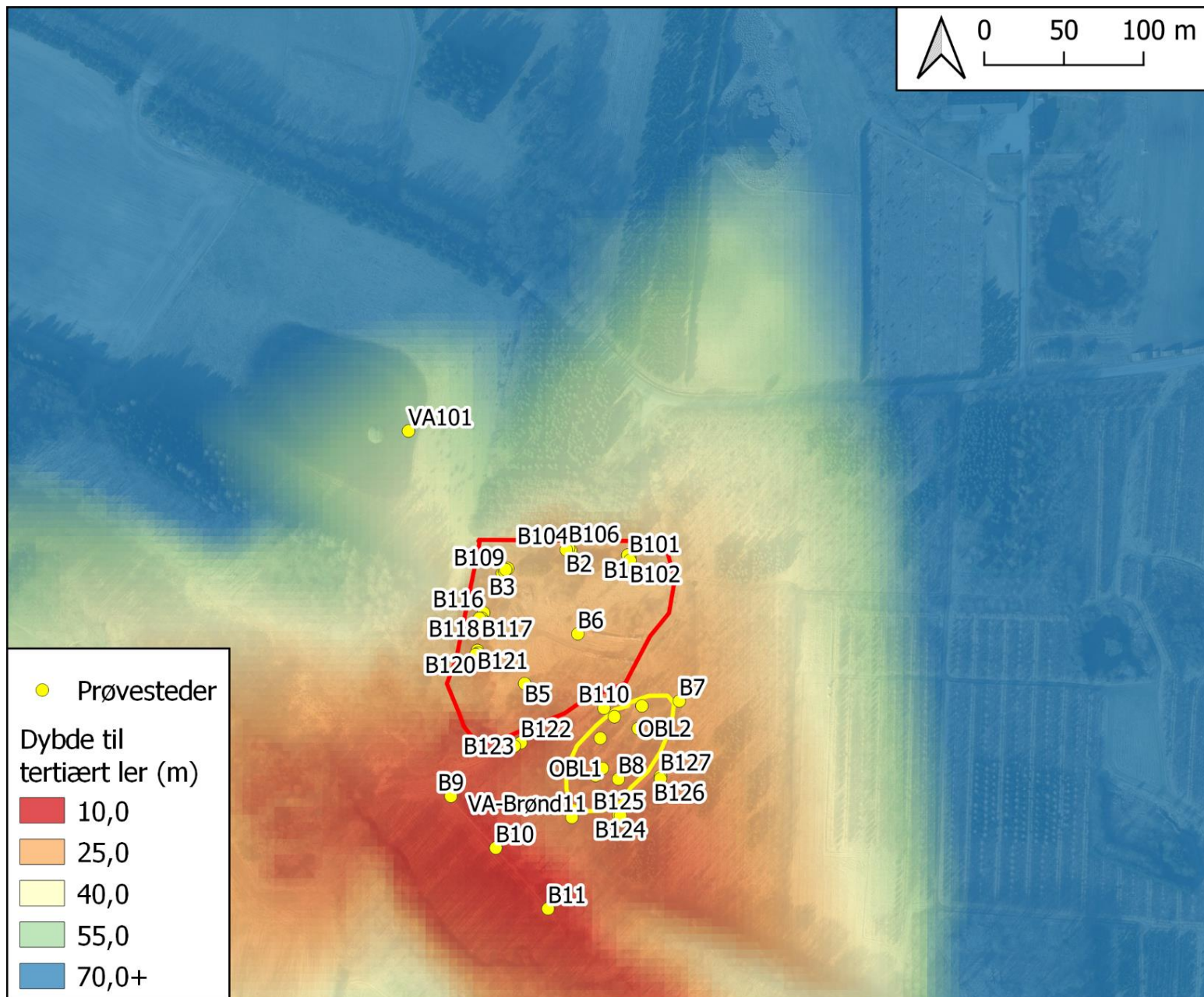


tTEM undersøgelse



tTEM undersøgelse



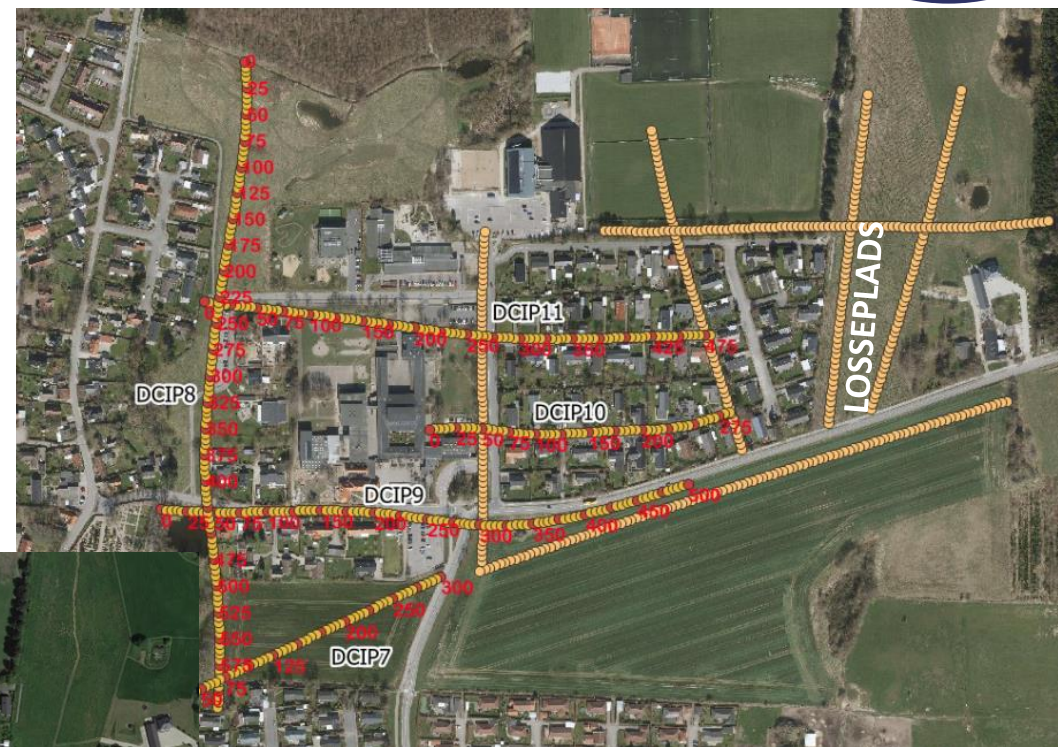
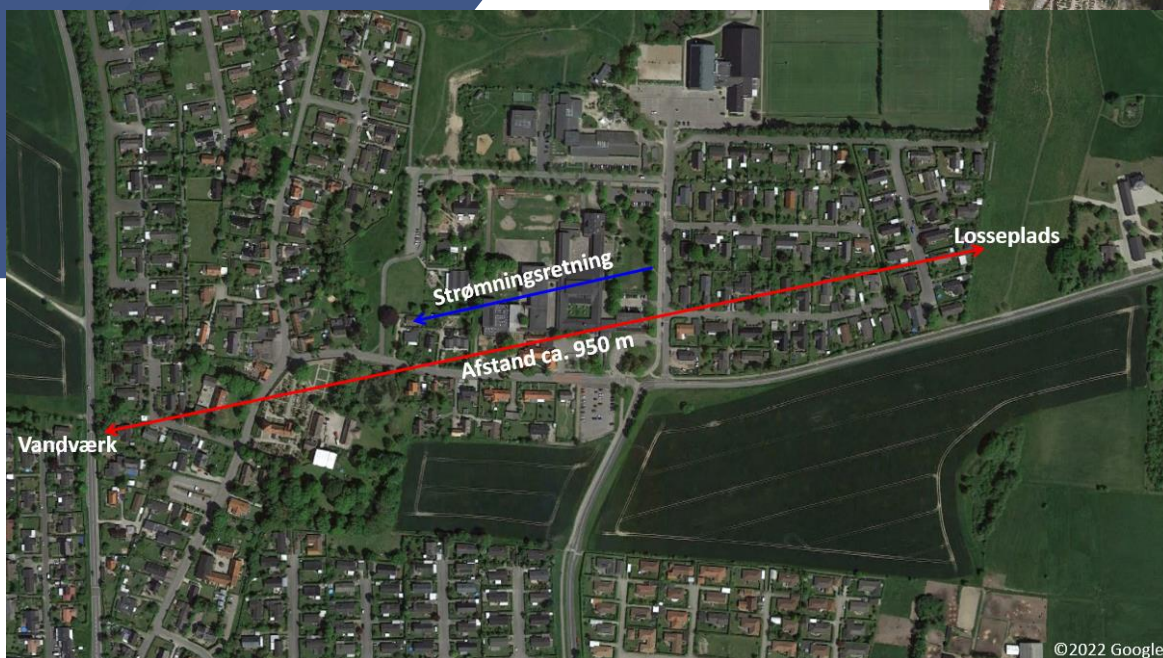


Fordele

- Giver et detaljeret indblik i en kompliceret geologi.
- Styrker risikovurderingen.
- Værdifuld information ved planlægning af boringer, da sikkerheden for korrekt placering øges markant – kan evt. betyde færre boringer.

Geofysik anvendt i forbindelse med forureningsundersøgelse Grundvandsforurening fra losseplads

Nanna Muchitsch
Fagchef, civilingeniør



Problemstilling

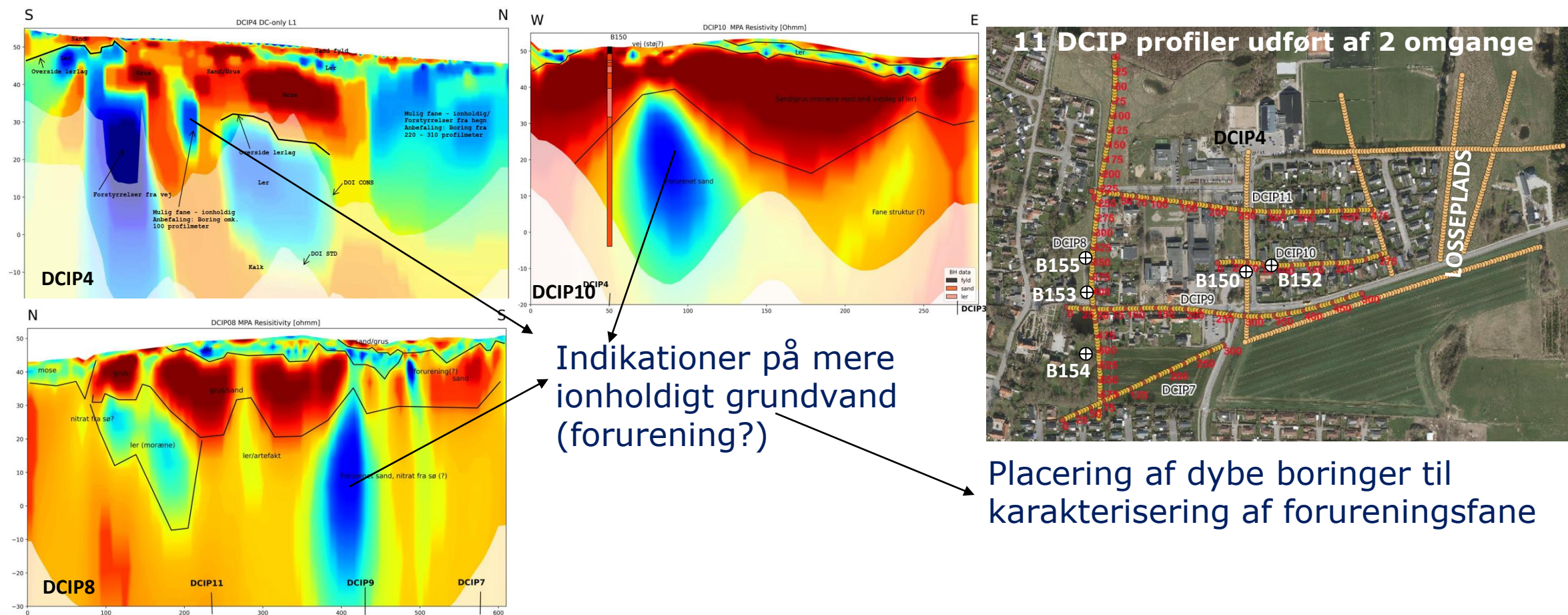
- Grundvandsforurening fra losseplads med chlorerede nedbrydningsprodukter og phenoxysyrer
- Yderligere faneundersøgelse kræver dybe boringer > 50 m



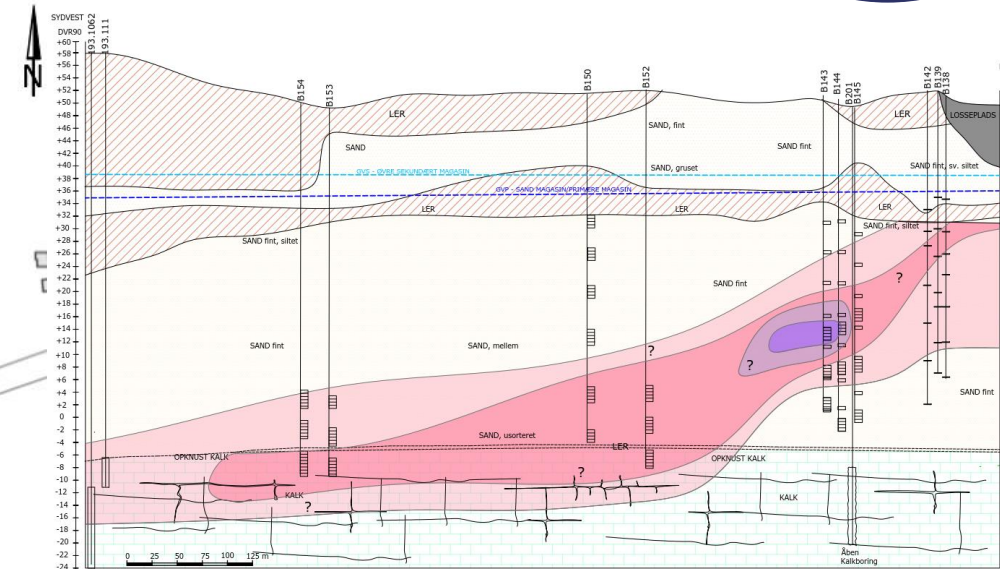
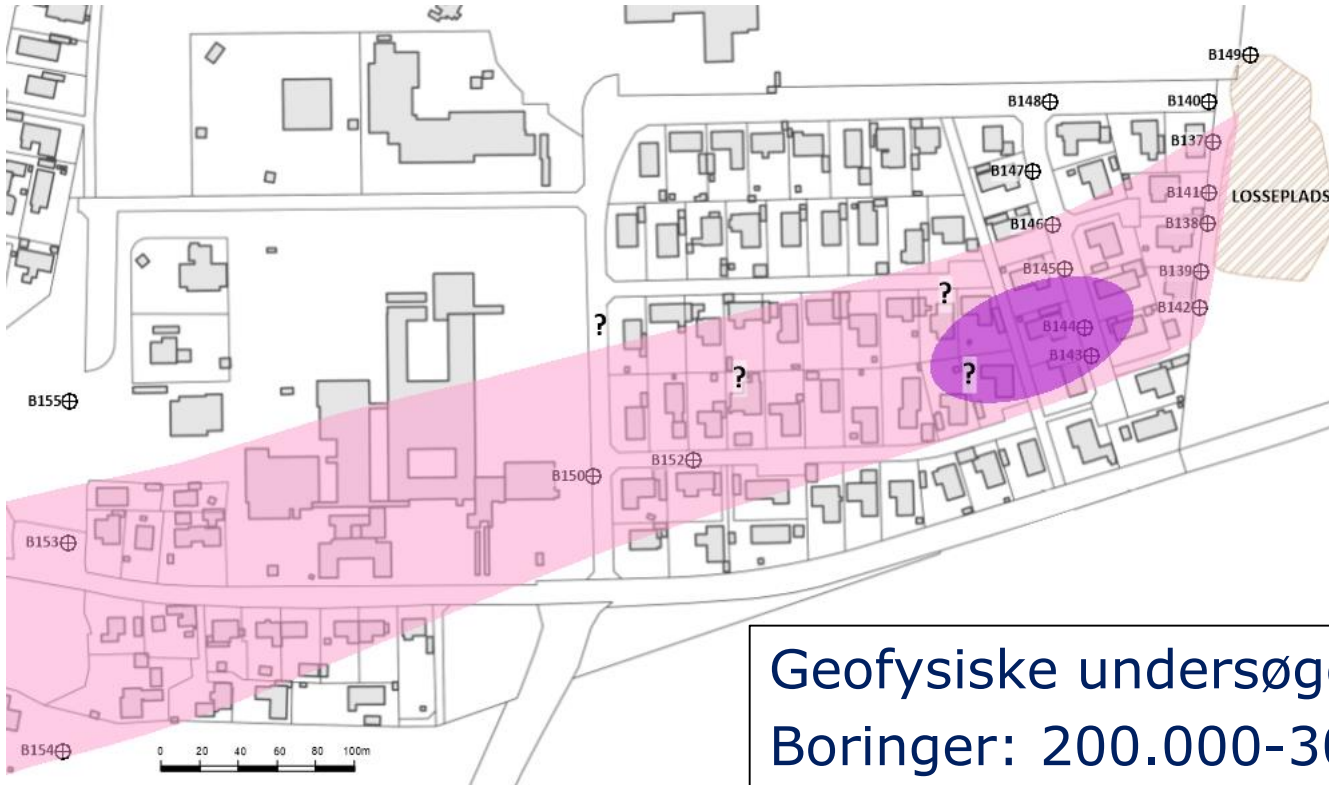
- Hvor skal boringerne placeres?
- Skal vi skyde i blinde, eller kan geofysiske undersøgelser hjælpe os?

DCIP-profiler

- Der er konstateret en korrelation mellem grundvandets elektriske ledningsevne (EC)/indholdet af uorganiske salte (ioner) og grundvandsforureningen
- ⇒ DCIP-signalet kan anvendes som faneindikatorer



Udbytte og økonomi



Geofysiske undersøgelser: ca. 200.000,-
Boringer: 200.000-300.000 pr. stk.

- En lang og dybtliggende forureningsfane er karakteriseret med relativt få boringer
- De geofysiske undersøgelser er udført i et byområde med bebyggelse, veje o.l.
- I tolkningen har det være muligt at vurdere forstyrrelser fra veje, ledninger o.l.

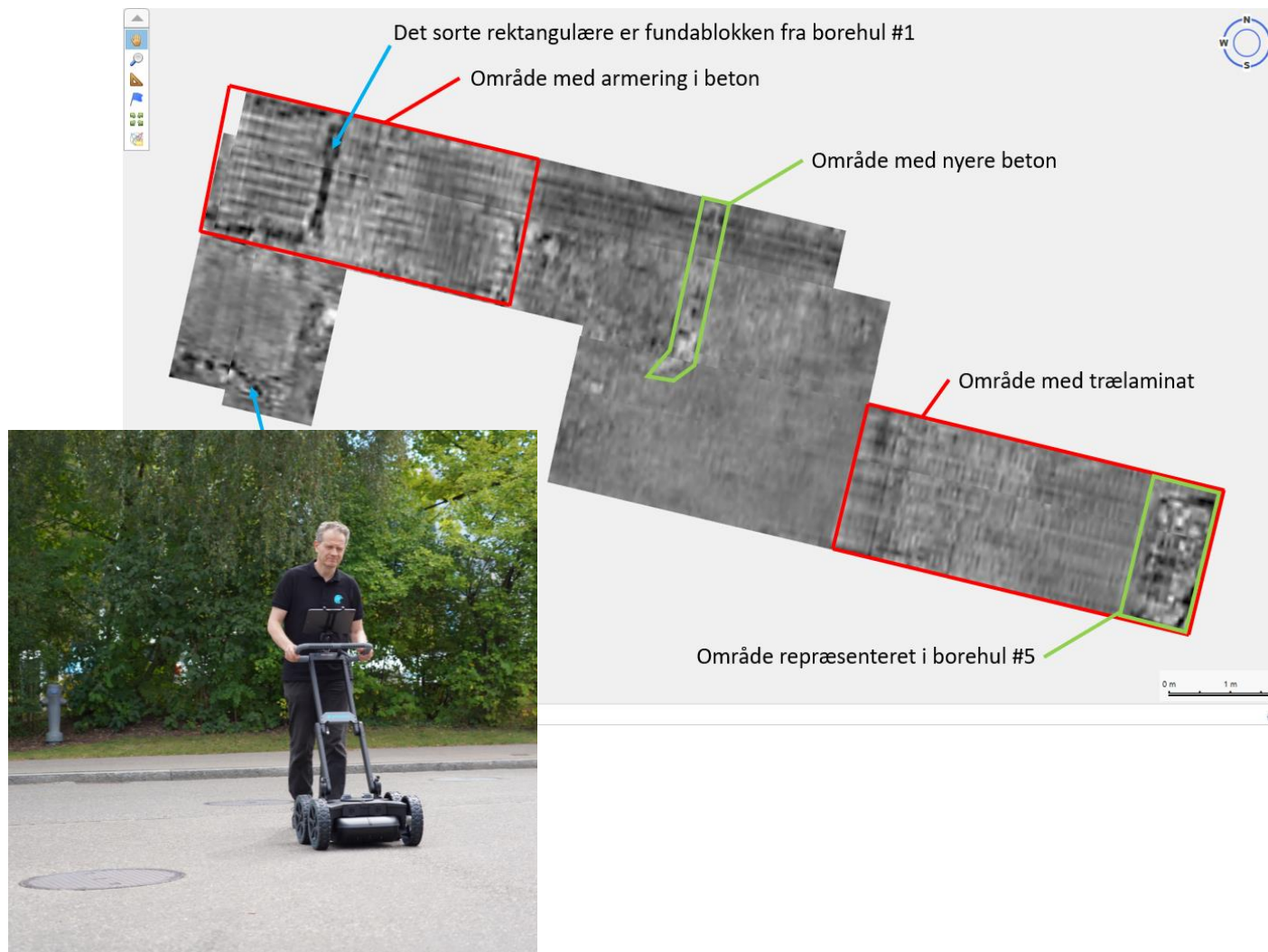
Geofysik for alle

Opsamling på erfaringer med værktøjskassen

Flemming Jørgensen, Region Midtjylland

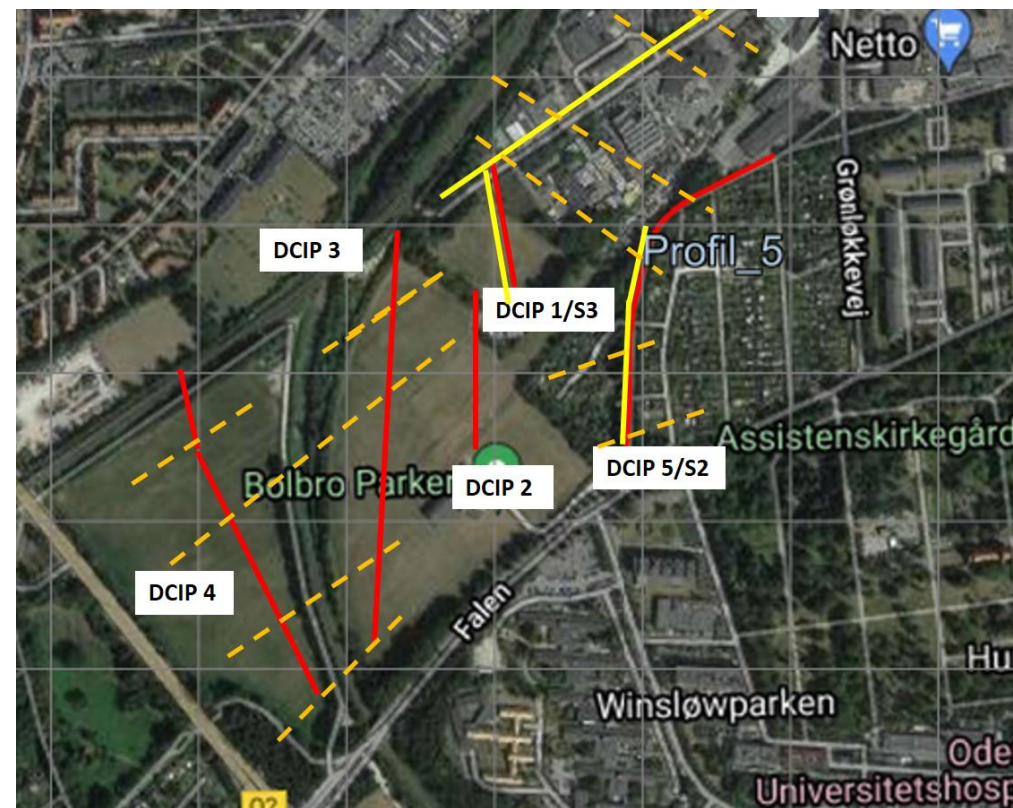
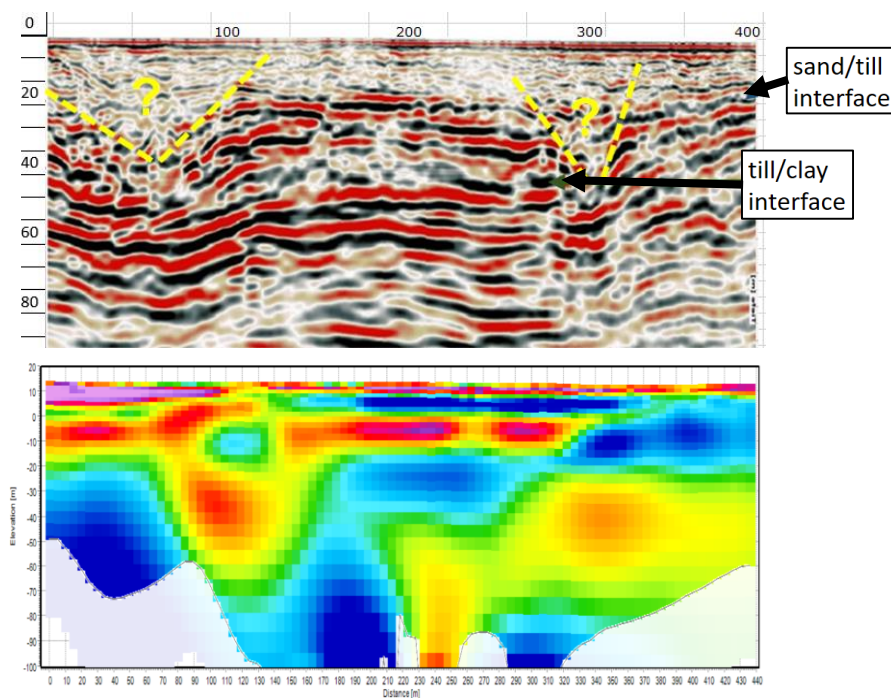
Georadar til gulvkonstruktioner

- Opløsning: cm
- Indtrængning: <1 m
- 3D
- Hyldevare?



Seismisk kortlægning:

- Opløsning: ca. 5-10 m
- Indtrængning > 100 m
- 2D
- Geologiske strukturer
- Ikke hyldevare



Cross-borehole georadar

- Opløsning: ca. 10 cm
- 2D (mellem borehuller)
- Lerindhold og vandindhold
- Ikke hyldevare

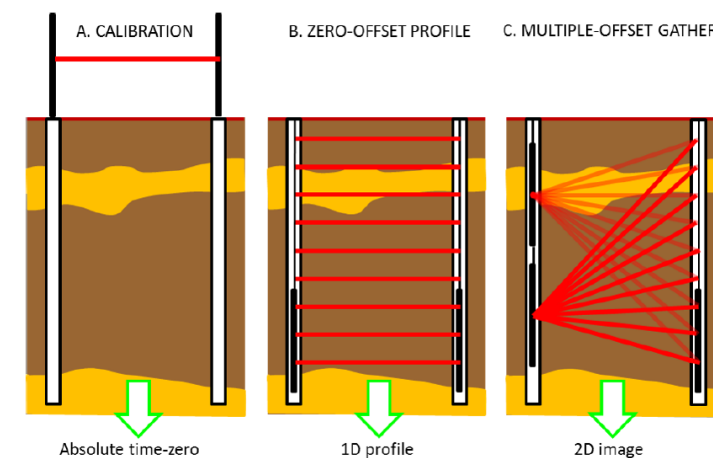
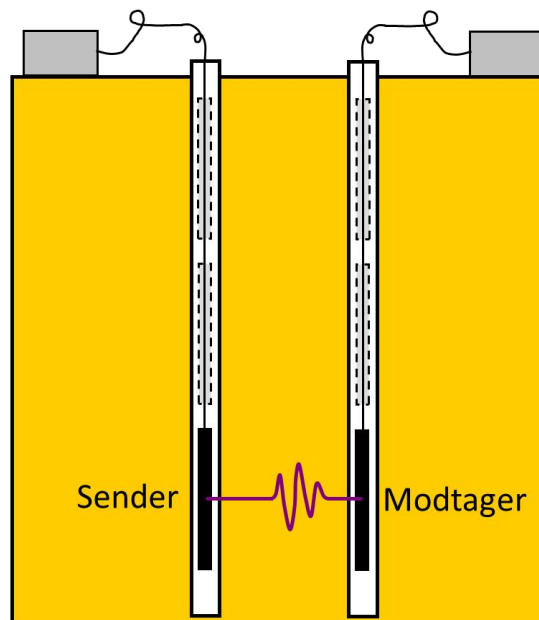
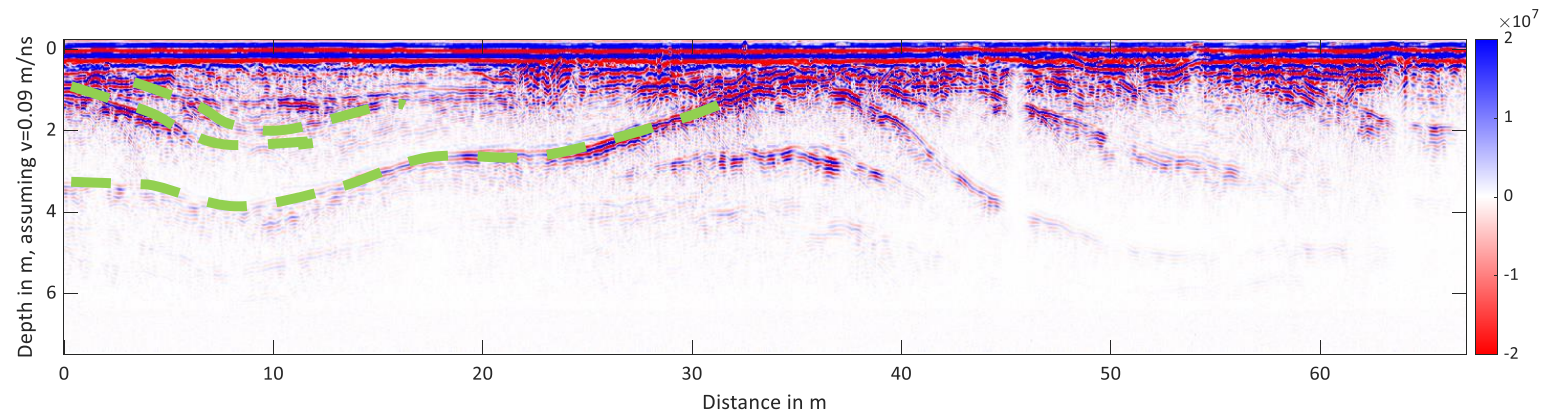


Figure 2.1: A. Calibration of time-zero. B. Illustration of ZOP data acquisition geometry. C. Illustration of MOG data acquisition geometry. Reprinted from Larsen *et al.* (2016).

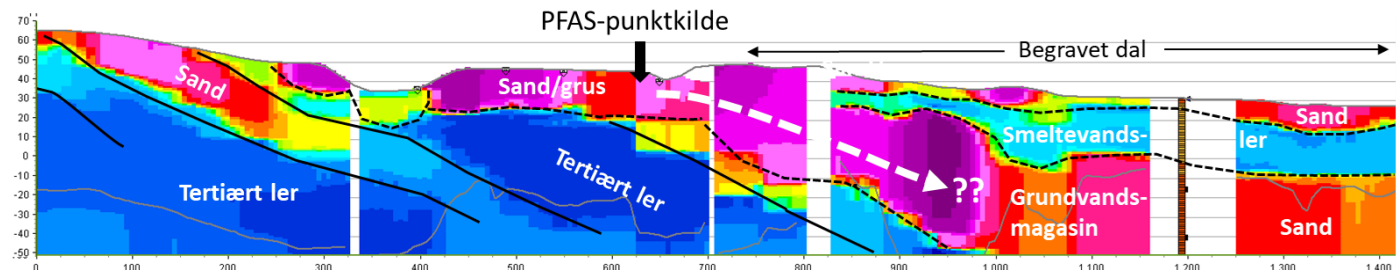
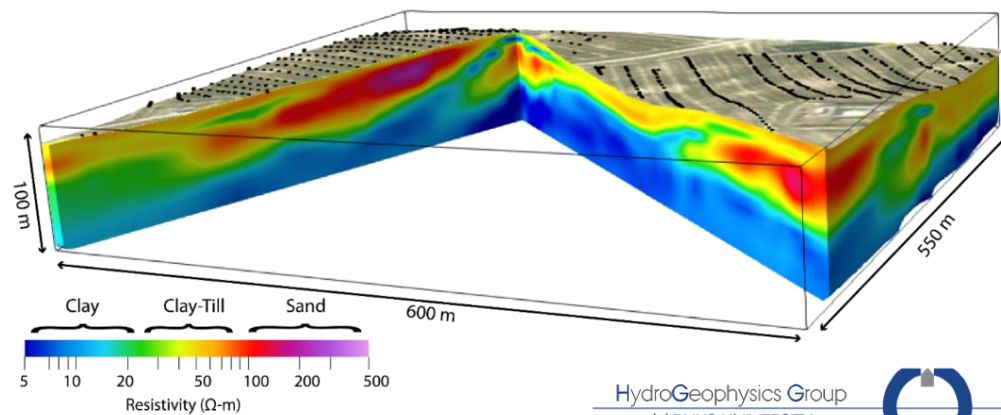
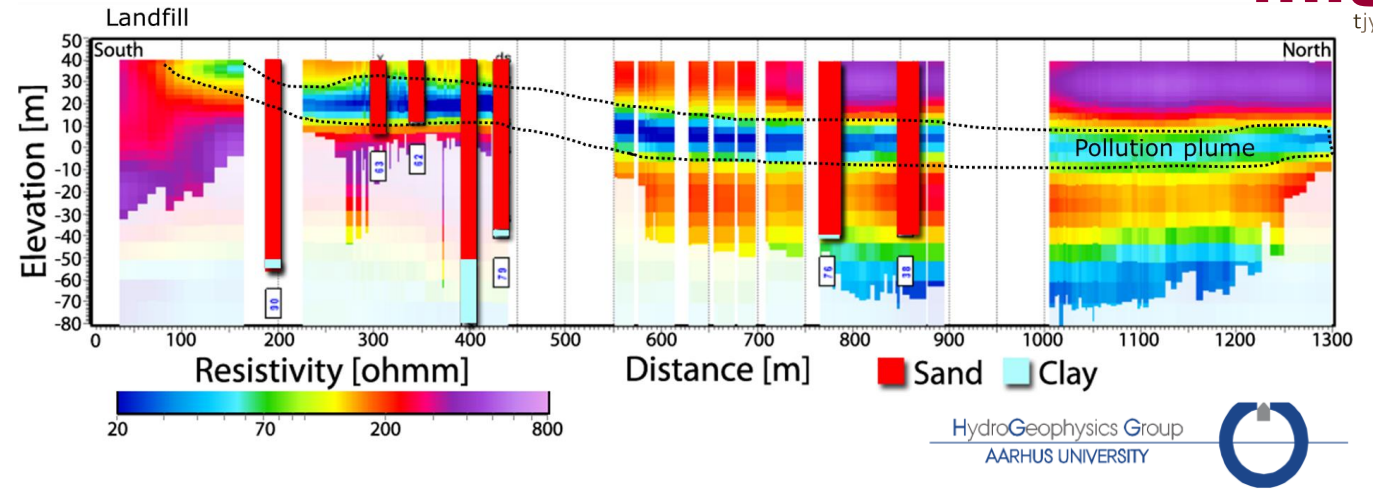
Georadar til geologi

- Opløsning: ca. 10-20 cm?
- Indtrængning: <10 m
- 2D (3D)
- Geologiske strukturer
- Hyldevare?



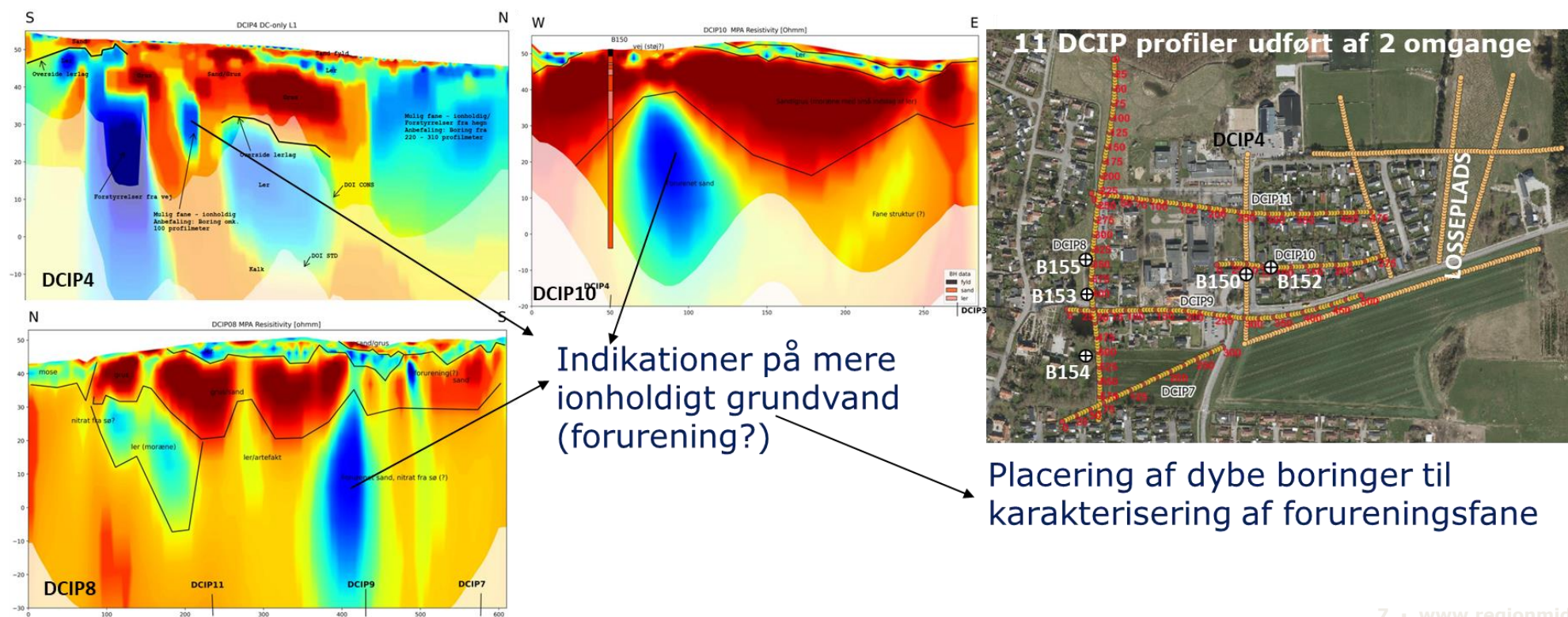
tTEM

- Opløsning: ca. 2-4 m
- Indtrængning: 40-100 m
- 3D
- Geologisk kortlægning, lerindhold + forureningsfaner
- Hyldevare



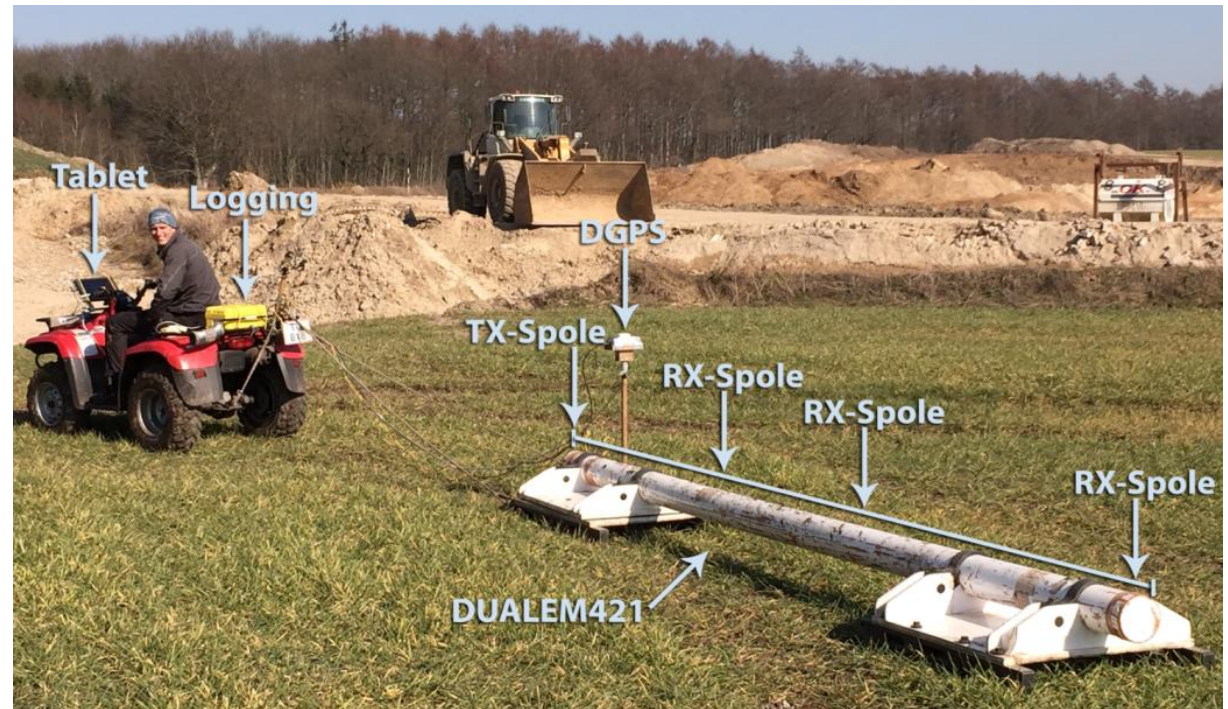
DCIP/ERT

- Opløsning: ca. 1-3 m
- Indtrængning 40-70 m
- 2D (3D)
- Geologisk kortlægning, lerindhold + forureningsfaner
- Hyldevare



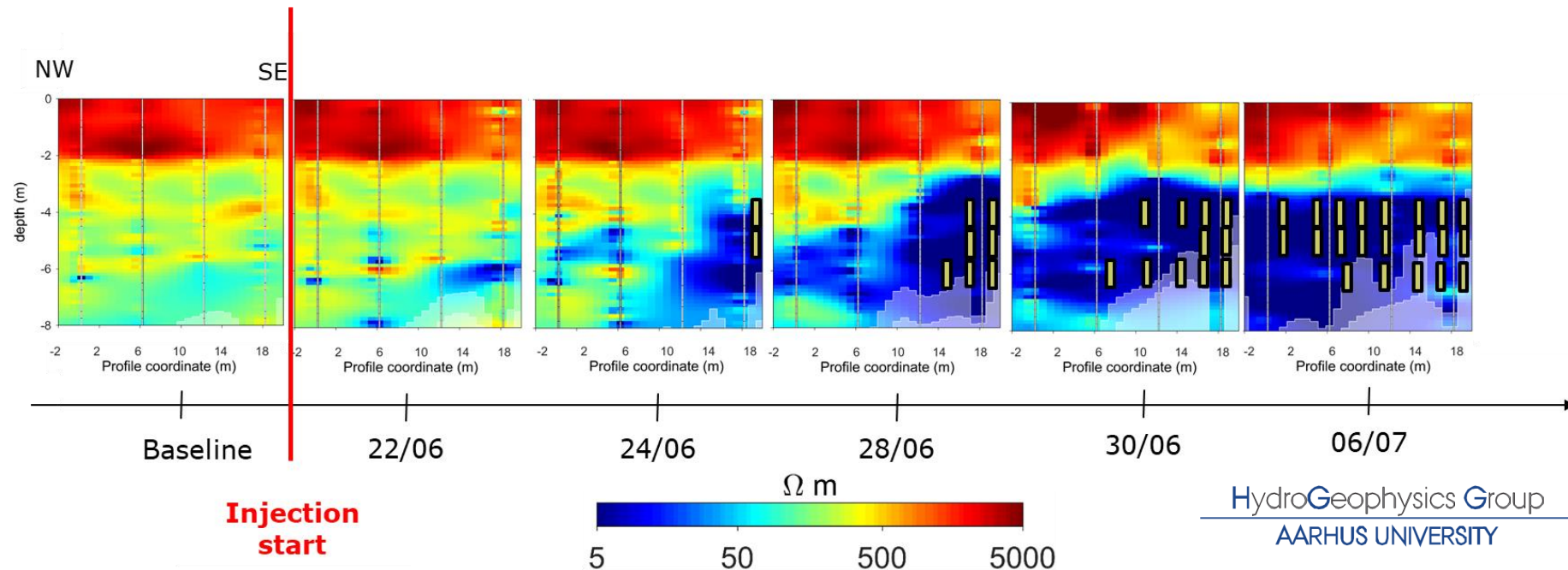
DualEM

- Opløsning: ca. 0,5-1 m
- Indtrængning: 5-10 m
- 3D
- Geologisk kortlægning, lerindhold
- Hyldevare



Crosshole ERT/DCIP

- Opløsning: ca. 10-50 cm?
- 3D
- Lerindhold og vandindhold + faner
- Monitering
- Ikke hyldevare



Geofysiske metoder til forureningsundersøgelser

- Forskellige anvendelser og formål
- Stor udvikling

